

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 23445

(13) С1

(46) 2021.06.30

(51) МПК

F 03H 1/00 (2006.01)

(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ СТРУЙНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ

(21) Номер заявки: а 20180498

(22) 2018.12.04

(43) 2020.08.30

(71) Заявитель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(72) Авторы: Бондаренко Виталий Парфирович; Чубенко Евгений Борисович; Редько Сергей Владимирович; Долгий Алексей Леонидович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(56) US 4328667, 1982.

WO 2010/001422 A1, 2010.

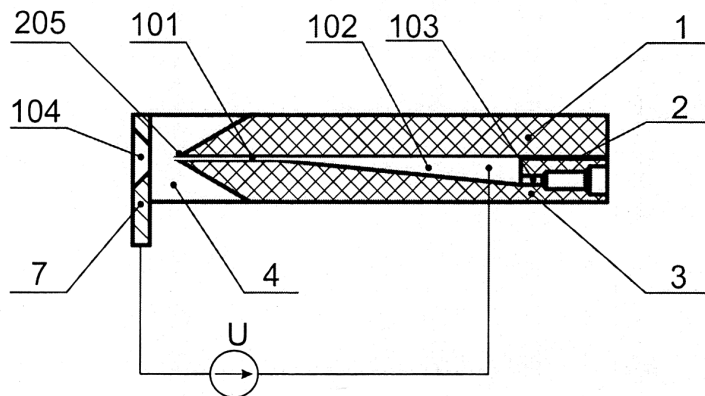
US 6516604 B2, 2003.

US 2010/0018185 A1, 2010.

RU 2618761 C1, 2017.

(57)

Способ изготовления ионного источника для струйного электростатического микродвигателя, при котором из полиэфирэфиркетона, или поливинилиденфторида, или фторопласта изготавливают эмиттер, включающий две половины; по меньшей мере в одной половине эмиттера формируют фрезерованием или резкой углубление треугольной, полукруглой или трапециевидной формы в плане, глубина которого уменьшается до нуля вблизи предназначенного для формирования капиллярной щели края упомянутой половины эмиттера, а ширина уменьшается при удалении от упомянутого края; изготавливают прокладку путем нанесения слоя фоторезиста необходимой толщины центрифугированием или напылением на поверхность по меньшей мере одной половины эмиттера; прижимают друг к другу и соединяют половины эмиттера при помощи крепежных элементов,



Фиг. 8

формируя полость для топлива с капиллярной щелью; изготавливают экстрактор в виде пластины из коррозионностойкого металла, в которой механической обработкой формируют прорезь прямоугольной формы со скругленными короткими сторонами и трапециевидным сечением; прикрепляют держателями экстрактор к эмиттеру напротив капиллярной щели.

Изобретение относится к способам изготовления ионных источников для струйных электростатических микродвигателей с полым капиллярным щелевым эмиттером и технологии их изготовления и используется в качестве составляющей части двигательной установки малых космических аппаратов, эксплуатируемых на низкой околоземной орбите и в космическом пространстве.

Известна конструкция ионного источника для струйного электростатического микродвигателя с полым капиллярным щелевым эмиттером [1] (фиг. 1-4), в котором капиллярная щель 18 (фиг. 1) образована остро заточенными кромками двух плоских металлических элементов 11 и 12 (фиг. 2), представляющих собой половину модуля эмиттера 10. Угол заточки кромок элементов эмиттера в данной конструкции делают меньше 30° , а ширину капиллярной щели не более 20 мкм. Данный ионный источник рассчитан на использование в качестве топлива жидкого цезия. Внутри каждого элемента эмиттера сделано углубление 13, которое заполняют пористой металлической губкой 17 для увеличения капиллярных сил, доставляющих топливо к капиллярной щели 18. Щель образуется либо за счет удаления части материала только из одной или из обеих половин эмиттера, либо путем размещения металлической прокладки (фольги) между половинами эмиттера, либо путем нанесения электрическим или химическим методом слоя материала 21 на поверхность одной из половин эмиттера (фиг. 3). Прокладка или осажденный слой материала удаляется в области 22 капиллярной щели 18 вдоль ее кромки 19. На некотором расстоянии от капиллярной щели 18 располагается тянущий электрод-экстрактор 15, имеющий прорезь (пролетную щель), расположенную напротив капиллярной щели 18. Напротив концов 24 (фиг. 4) капиллярной щели 18 в прорези электрода-экстрактора 15 имеются расширения 25 для компенсации так называемых "краевых эффектов", связанных с повышенной напряженностью электрического поля возле концов 24 капиллярной щели. Внутренняя поверхность углубления 13 и кромок 19 может быть покрыта слоем металла для улучшения смачиваемости материала элементов эмиттера 11 и 12 топливом. Наружная поверхность кромок 19 может быть покрыта слоем диэлектрика (оксидами, боридами, нитридами, карбидами и т.д.), который не смачивается топливом, для предотвращения растекания топлива по наружной поверхности эмиттера.

Описанная конструкция обладает рядом недостатков:

элементы изготавливают из металла с высокой химической стойкостью по отношению к используемому топливу, являющимся химически агрессивным веществом, и отдельным его компонентам, хорошей смачиваемостью топливом, высокой термической стабильностью и возможностью к механической обработке для обеспечения высокой точности и малого количества дефектов изготовления. Этим требованиям удовлетворяют только некоторые специальные марки нержавеющей стали, никелевых сплавов (например, инконель) и других подобных материалов;

из-за высокой электропроводности щелеобразующих деталей эмиттера для обеспечения высоких значений напряженности электрического поля радиус заточки острых кромок эмиттера не превышает 1 мкм. При этом любые неоднородности на кромках могут привести к локальному изменению электрического поля и, как следствие, к неоднородности истекающего потока частиц топлива, ускоряемого электродом-экстрактором;

при высокой напряженности электрического поля происходит распыление материала острозаточенных металлических кромок элементов эмиттера. Эрозия кромок приводит к

неравномерному распределению электрического поля между эмиттером и экстрактором, что также нарушает однородность истекающего потока частиц.

Наиболее близким по технической сущности к заявленному изобретению является ионный источник для струйного электростатического микродвигателя [2] (фиг. 5-6), эмиттер 1 которого состоит из двух половин 3 и 5, имеющих острые кромки 3D и 5D, образующие края капиллярной щели 13 (фиг. 5). Углы α и β делают равными или больше 40° . Отверстие 7 в половине эмиттера 3 служит для подачи топлива в капиллярную щель 13. В качестве топлива используют жидкий металл, например цезий. Половины эмиттера 3 и 5 изготавливаются из неэлектропроводящего материала, например стекла, кварца, керамики, стеклокерамики, полуметалла, электрооптических кристаллов, обрабатываемого при помощи технологий, которые используются для изготовления оптических элементов. На примыкающие друг к другу поверхности одной или обеих половин эмиттера 3 и 5 методом вакуумного осаждения наносят слой материала 9, формирующий прокладку, толщина которой задает ширину капиллярной щели эмиттера 13. В передней части эмиттера прокладка имеет прорезь 15, являющуюся щелевым капилляром (фиг. 6). В качестве материала прокладки используют металл, оксид металла, оксид кремния или другой неэлектропроводящий материал, который может быть осажден вакуумными методами. Половины эмиттера 3 и 5 соединяются друг с другом при помощи винтов (болтов), которые проходят через сквозные отверстия 17 в половинах эмиттера 3 и 5 и гаек.

Данная конструкция обладает рядом недостатков:

половины эмиттера изготавливают из хрупких материалов, стекла, керамики, кварца, стеклокерамики, полуметалла или электрооптических кристаллов, которые могут легко разрушиться от воздействия повышенных вибраций и ускорений, неизбежных при выводе на околоземную орбиту малых космических аппаратов;

большое различие в коэффициентах температурного расширения между материалом эмиттера и металлических креплений может привести к разрушению эмиттера при циклическом изменении его температуры;

высокая сложность и трудоемкость в изготовлении половин эмиттера при использовании технологий обработки оптических элементов.

Задача данного изобретения - получение простого в изготовлении ионного источника для струйного электростатического микродвигателя, эмиттер которого выполнен из химически стойкого материала с высокой механической прочностью и стабильностью механических и термических свойств, механически обрабатываемого простыми методами сверления, фрезерования и резки для получения требуемой конфигурации эмиттера.

Для решения поставленной задачи предлагается следующее.

Способ изготовления ионного источника для струйного электростатического микродвигателя, при котором из полиэфирэфиркетона, или поливинилиденфторида, или фторопласта изготавливают эмиттер, включающий две половины; по меньшей мере в одной половине эмиттера формируют фрезерованием или резкой углубление треугольной, полукруглой или трапециевидной формы в плане, глубина которого уменьшается до нуля вблизи предназначенного для формирования капиллярной щели края упомянутой половины эмиттера, а ширина уменьшается при удалении от упомянутого края; изготавливают прокладку путем нанесения слоя фоторезиста необходимой толщины центрифугированием или напылением на поверхность по меньшей мере одной половины эмиттера; прижимают друг к другу и соединяют половины эмиттера при помощи крепежных элементов, формируя полость для топлива с капиллярной щелью; изготавливают экстрактор в виде пластины из коррозионностойкого металла, в которой механической обработкой формируют прорезь прямоугольной формы со скругленными короткими сторонами и трапециевидным сечением; прикрепляют держателями экстрактор к эмиттеру напротив капиллярной щели.

Краткое описание приведенных фигур:

фиг. 1 - поперечный разрез предложенного в [1] ионного источника для струйного электростатического микродвигателя с металлическим полым капиллярным щелевым эмиттером;

фиг. 2 - изометрическое изображение половины предложенного в [1] металлического полого капиллярного щелевого эмиттера;

фиг. 3 - конфигурация щели предложенного в [1] металлического полого капиллярного щелевого эмиттера;

фиг. 4 - конструкция экстрактора предложенного в [1] ионного источника для струйного электростатического микродвигателя;

фиг. 5 - конструкция предложенного в [2] неэлектропроводящего полого капиллярного щелевого эмиттера, вид сбоку;

фиг. 6 - конструкция предложенного в [2] неэлектропроводящего полого капиллярного щелевого эмиттера, вид спереди;

фиг. 7 - конструкция ионного источника для струйного электростатического микродвигателя по предложенному способу изготовления, общий вид;

фиг. 8 - конструкция ионного источника для струйного электростатического микродвигателя по предложенному способу изготовления, поперечный разрез;

фиг. 9 - внешний вид профилированной половины эмиттера струйного электростатического микродвигателя по предложенному способу изготовления;

фиг. 10 - возможные геометрические конфигурации полости в профилированной половине эмиттера струйного электростатического микродвигателя по предложенному способу изготовления;

фиг. 11 - внешний вид непрофилированной половины эмиттера струйного электростатического микродвигателя по предложенному способу изготовления;

фиг. 12 - внешний вид экстрактора струйного электростатического микродвигателя по предложенному способу изготовления;

фиг. 13 - распределение напряженности электрического поля вдоль кромки лезвий в плоскости, перпендикулярной капиллярной щели эмиттера струйного электростатического микродвигателя, изготовленного по предложенному способу;

фиг. 14. - распределение напряженности электрического поля на краю эмиттера струйного электростатического микродвигателя, изготовленного по предложенному способу, в плоскости, параллельной капиллярной щели эмиттера, при расстоянии до тянущего электрода 3 мм.

Конструкция ионного источника для струйного электростатического микродвигателя по предложенному способу изготовления представлена на фиг. 7 и 8.

Она включает полый капиллярный щелевой эмиттер, состоящий из двух половин 1 и 3, экстрактор 7 и держатели 4.

Половины эмиттера 1 и 3 (фиг. 7) изготавливаются из неэлектропроводящего полимерного материала. Этот материал должен поддаваться простой механической резке, сверлению, фрезерованию и полировке, обладать устойчивостью к воздействию агрессивных кислотных сред, высокой электрической прочностью и длительное время выдерживать воздействие температуры до 150 °С. В качестве такого материала могут быть использованы полиэфирэфиркетон, поливинилиденфторид, фторопласт или другие подобные полимеры.

Половина эмиттера 3 является профилированной и содержит полость 102 (фиг. 9), имеющую в плане форму треугольника, трапеции или полукруга (фиг. 10). Полость 102 формируют методами механической обработки (например, фрезеровкой, резкой). Ее глубина должна уменьшаться до нуля вблизи края капиллярной щели 101 (фиг. 8) или может доходить до него. При этом она одновременно расширяется к краю капиллярной щели. Вторая половина эмиттера 1 может иметь или не иметь такую же полость. Геометрические

размеры и конфигурацию полости 102 выбирают исходя из механических и гидродинамических характеристик топлива, для работы с которым предназначен данный ионный источник, и требований к ламинарности потока топлива внутри эмиттера в процессе работы струйного электростатического микродвигателя. В торце стенки полости, максимально удаленной от края капиллярной щели, сверлением изготавливают отверстие 103 (фиг. 9), которое используется для подачи топлива в полость 102 через штуцерное подключение либо через шланг, непосредственно вставленный в отверстие 103. Внутренняя поверхность полости 102 может быть обработана путем вакуумного напыления слоя металла, например никеля, толщиной до 1 мкм для более равномерного распределения потенциала внутри полости с топливом.

Половины эмиттера 1 и 3 прилегают друг к другу плоскими поверхностями 201 и 203 (фиг. 9, 11). Эти поверхности подвергают механической полировке для достижения класса обработки не ниже 12-го. Между половинами эмиттера располагается неэлектропроводящая прокладка 2 (фиг. 11), наличие которой приводит к образованию капиллярной щели 101 соответствующей ширины. Прокладку изготавливают путем нанесения слоя позитивного или негативного фоторезиста нужной толщины на поверхность одной из половин эмиттера (фиг. 11). Толщину прокладки выбирают исходя из химического состава и вязкости жидкого топлива. Обычно толщина прокладки составляет от 2 до 30 мкм. Фоторезист наносят на поверхность непрофилированной половины эмиттера 1 методом центрифугирования или напыления. Однако он может быть нанесен и на профилированную половину эмиттера либо на обе половины эмиттера одновременно. После нанесения фоторезиста часть его поверхности подвергают экспонированию через фотолитографическую маску, и затем фоторезист выборочно удаляют. При этом на поверхности элемента эмиттера 1 должен остаться слой фоторезиста, инверсно повторяющий конфигурацию полости 102 профилированной половины эмиттера 3. В области капиллярной щели 101 могут располагаться островки фоторезиста 106 (фиг. 11), которые необходимы для того, чтобы капиллярная щель, имеющая микрометровую толщину, не смыкалась и сохраняла необходимую ширину по всей протяженности, когда половины эмиттера плотно прижимаются друг к другу. Количество островков выбирают исходя из длины капиллярной щели и наличия в ее области крепежных элементов.

Кромки половин эмиттера 205 (фиг. 8), образующие край капиллярной щели 101, могут иметь любой возможный угол заточки менее 90° . Так как неэлектропроводящие половины эмиттера не участвуют в формировании электрического поля между эмиттером и экстрактором, то они, в отличие от эмиттеров, изготовленных из проводящих материалов, могут иметь тупые кромки (что соответствует углу заточки 90°). Однако предпочтительно, чтобы кромки 205 имели острый угол заточки около $30-45^\circ$ для того, чтобы жидкое топливо, проникая из капиллярной щели 101, за счет эффекта смачивания не растекалось по наружной поверхности половин эмиттера. Радиус заточки кромок 205 эмиттера может быть любым максимально достижимым при использовании имеющегося в наличии оборудования для механической обработки.

Половины эмиттера 1 и 3 имеют ряд отверстий 202 (фиг. 9, 11), расположенных по их площади, которые служат для соединения и прижима половин эмиттера друг к другу при помощи винтов, болтов или заклепок 10 (фиг. 7). Часть отверстий может быть использована для размещения направляющих шпилек 11, изготовленных из металла или полимерного материала, служащих для прецизионного позиционирования элементов эмиттера друг относительно друга. Отверстия 202 (фиг. 9, 11) должны находиться вне объема полости 102, но могут проходить через капиллярную щель 101. В этом случае вокруг отверстия из фоторезиста формируют островок 106 (фиг. 11). Расположение отверстий 202 может быть произвольным, но должно обеспечивать достаточный прижим для герметичного соединения половин эмиттера 1 и 3 для предотвращения утечки топлива. При позиционировании половин эмиттера друг относительно друга необходимо достичь

максимально возможной параллельности кромок капиллярной щели эмиттера, чтобы обеспечить однородность и равномерность распыления топлива вдоль щели.

В качестве топлива в предлагаемом струйном электростатическом микродвигателе используют соли неорганических кислот 1-этил-3-метилимидозола, 1-бутил-3-метилимидозола или другие ионные жидкости с высокой электропроводностью и температурой плавления ниже температуры плавления полимерного материала, из которого изготовлены половины эмиттера. Предпочтительно использовать ионную жидкость с достаточно низкой температурой плавления, чтобы уменьшить температуру, при которой нужно термостатировать эмиттер ионного источника, так как это уменьшает нагрузку на бортовую сеть электропитания малого космического аппарата.

Для формирования электрического поля, создаваемого источником напряжения U (фиг. 8), которое должно вызывать эмиссию ионов топлива с поверхности жидкости в капиллярной щели эмиттера, конструкция ионного источника включает экстрактор 7 (фиг. 7, 8 и 12). Для более эффективного использования топлива источник напряжения отрицательным полюсом подключают к экстрактору, а положительным - непосредственно к электропроводящему топливу либо через металлический штуцер для подключения шланга подачи топлива, либо через металлические элементы системы подачи топлива, имеющие непосредственный электрический контакт к нему.

Экстрактор представляет собой металлическую пластину толщиной 1-5 мм, изготовленную из коррозионностойкого металла, устойчивого к воздействию компонентов топлива, например нержавеющей стали, никеля или коррозионностойких сплавов, в которой методами механической обработки сформирована пролетная щель 104 (фиг. 12). Длина пролетной щели 104 должна несколько превышать длину капиллярной щели 101. Высоту пролетной щели выбирают исходя из равномерности распределения электрического поля в пространстве между эмиттером и экстрактором. В поперечном сечении пролетная щель имеет форму трапеции, сужающейся в направлении к капиллярной щели эмиттера. Кромки 204 (фиг. 12), образующие узкую часть трапеции, заостряют для уменьшения искажения в распределении электрического поля, вносимых экстрактором. Угол заточки кромок 204 может быть 45° или меньше. В плане форму пролетной щели выполняют в виде прямоугольника со скругленными короткими сторонами. Такая конфигурация проста в изготовлении и позволяет получить равномерное распределение электрического поля между эмиттером и экстрактором вдоль капиллярной щели 101 эмиттера (фиг. 13, 14).

Для крепления и позиционирования экстрактора относительно эмиттера служат держатели 4 (фиг. 7, 8), которые крепятся винтами 6 и 9 к эмиттеру и экстрактору соответственно. Держатели изготавливают методами механической обработки из диэлектрического материала, с пробивным напряжением, достаточным для того чтобы обеспечить возможность формирования разности потенциалов между эмиттером и экстрактором до 10 кВ, например полиэфирэфиркетона, поливинилиденфторида или фторопласта. Для точного позиционирования деталей друг относительно друга используют металлические или пластиковые шпильки 5 и 8. Расстояние между кромками капиллярной щели эмиттера и плоскостью экстрактора может быть от 1 до 10 мм и выбирается исходя из требований к рабочему напряжению и равномерности распределения электрического поля между эмиттером и экстрактором.

Пример.

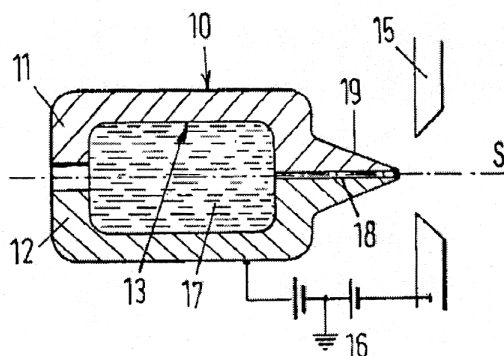
Для изготовления половин эмиттера в качестве исходного материала берут полиэфирэфиркетон. Половины эмиттера выполняют в виде прямоугольных параллелепипедов размером $50 \times 70 \times 5$ мм. На одной из длинных сторон каждой из половин эмиттера делают заточку под углом 30° . В одной из половин эмиттера симметрично относительно середины половины эмиттера фрезерованием делают полость в форме треугольника в плане с основанием 50 мм и высотой 30 мм. Основание треугольной полости располагают в 10 мм от края острозаточенной кромки эмиттера. Глубина полости линейно возрастает от основа-

ния, около которого она равна нулю, до вершины, достигая 2,5 мм. В вершине треугольной полости сверлят отверстие диаметром 1,5 мм с осью, параллельной плоскости половины эмиттера, для подачи топлива в полость. В обеих половинах эмиттера симметрично сверлят отверстия для крепежных элементов. Отверстия располагают таким образом, чтобы только два крепежных элемента проходили через область капиллярной щели эмиттера, между основанием треугольной полости и острой кромкой эмиттера. Центры отверстий располагают в 5 мм от кромки эмиттера и в 18 мм от вершин основания треугольной полости эмиттера. После сверления и фрезерования поверхности половины эмиттера, которые при сборке эмиттера будут прилегать друг к другу, образуя капиллярную щель, полируют до 12-го класса чистоты поверхности. Далее на поверхность непрофилированной половины эмиттера методом центрифугирования наносят слой фоторезиста марки SU-8-20 толщиной 20 мкм. По слою фоторезиста делают фотолитографию, и фоторезист выборочно удаляют. В результате получают рисунок, повторяющий форму полости профилированной половины эмиттера. Пространство между основанием треугольной полости и острой кромкой эмиттера также оставляют свободным от фоторезиста, кроме островков фоторезиста каплеобразной формы вокруг отверстий для крепежных элементов. Готовые половины эмиттера позиционируют друг относительно друга при помощи металлических шпилек и прижимают друг к другу при помощи винтовых соединений. Экстрактор изготавливают из никелевой пластины толщиной 2 мм размером 10×80 мм. В середине пластины симметрично относительно ее краев путем механической обработки делают прорезь (пролетную щель) шириной 5 мм и длиной 70 мм в форме прямоугольника со скругленными углами. Радиус закругления углов 2,5 мм. Внутреннюю кромку пролетной щели затачивают под углом 45°. В пластине сверлением изготавливают сквозные отверстия для крепления экстрактора к держателям. Держатели изготавливают из полиэфирэфиркетона в виде прямоугольных параллелепипедов размером 10×50×5 мм. В держателях и эмиттере сверлят отверстия и располагают их таким образом, чтобы расстояние между экстрактором и острозаточенными кромками элементов эмиттера составляло 3 мм. Экстрактор, эмиттер и держатели позиционируют друг относительно друга металлическими шпильками и скрепляют винтами. Геометрический центр пролетной щели экстрактора при этом позиционируют строго напротив центра капиллярной щели эмиттера.

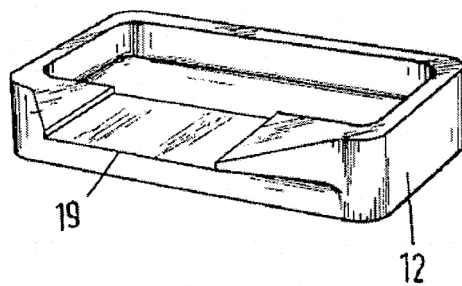
Собранные вместе экстрактор, эмиттер и держатели образуют ионный источник для струйного электростатического микродвигателя.

Источники информации:

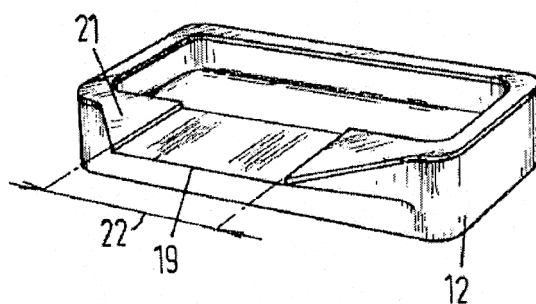
1. Патент США 4328667, МПК F03H 1/00, H01J 27/26, H01J 27/02, 1982.
2. Патент WO 2010/001422 A1, МПК F 03H 1/00, 2010.



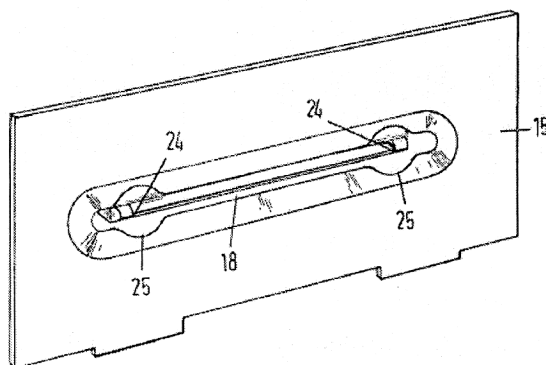
Фиг. 1



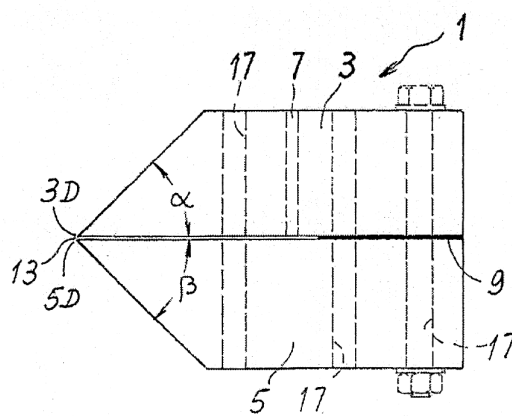
Фиг. 2



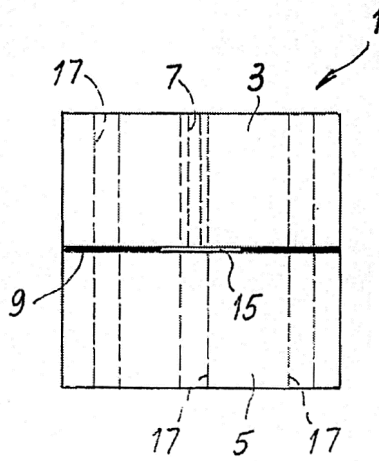
Фиг. 3



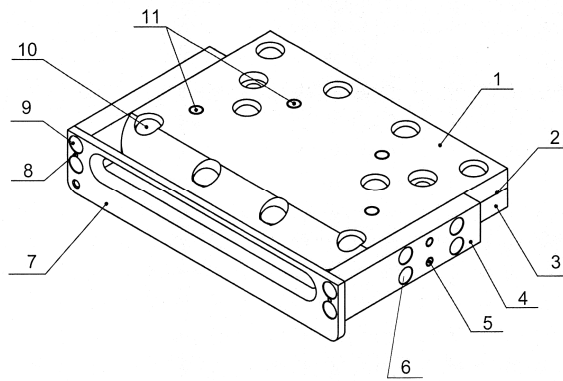
Фиг. 4



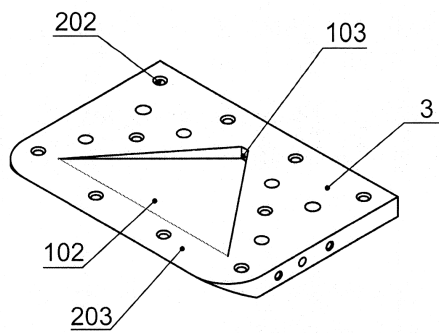
Фиг. 5



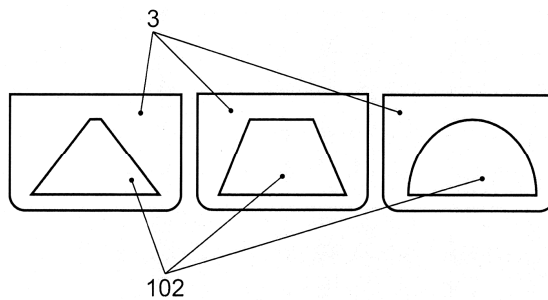
Фиг. 6



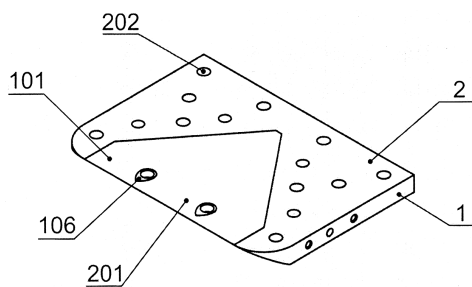
Фиг. 7



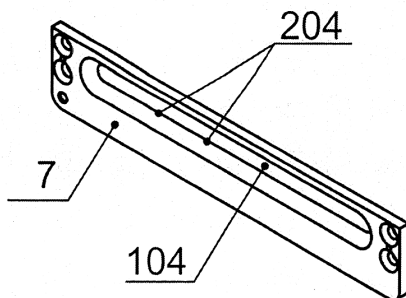
Фиг. 9



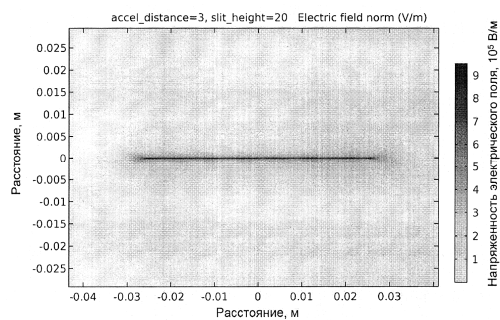
Фиг. 10



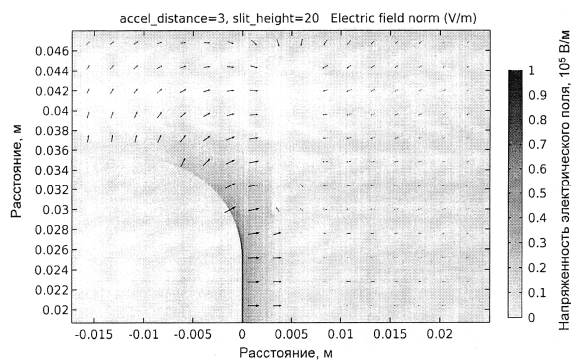
Фиг. 11



Фиг. 12



Фиг. 13



Фиг. 14