

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 21319

(13) С1

(46) 2017.10.30

(51) МПК

B 64G 4/40 (2006.01)

B 60K 5/08 (2006.01)

F 02K 9/16 (2006.01)

F 02K 1/52 (2006.01)

(54)

МИНИАТЮРНЫЙ ТВЕРДОТОПЛИВНЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ И СПОСОБ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

(21) Номер заявки: а 20130032

(22) 2013.01.10

(43) 2014.08.30

(71) Заявители: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"; Государственное научное учреждение "Институт тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова Национальной академии наук Беларуси" (ВУ)

(72) Авторы: Бондаренко Виталий Парфирович; Долгий Леонид Николаевич; Клышко Алексей Александрович; Чубенко Евгений Борисович; Редько Сергей Владимирович; Футько Сергей Иванович; Доброго Кирилл Викторович (ВУ)

(73) Патентообладатели: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"; Государственное научное учреждение "Институт тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова Национальной академии наук Беларуси" (ВУ)

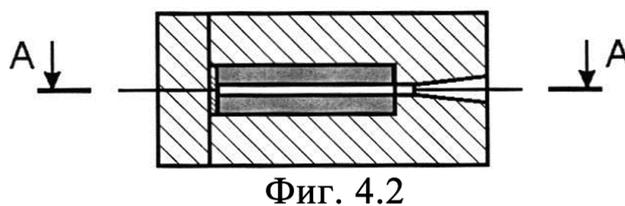
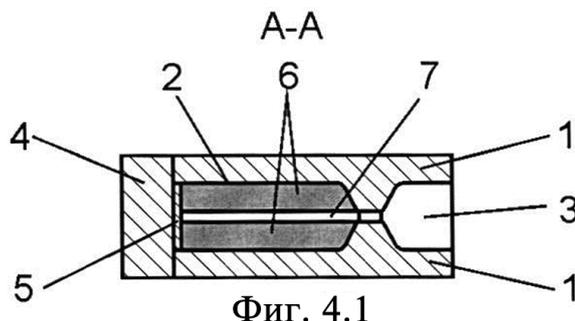
(56) ZHANG K.L. and others. Journal of Micromechanics and Microengineering. - 2004. - V. 126. - P. 785-792.

US 5456429, 1995.

LONDON A.P. and others. Sensors and Actuators A: Physical. - 2001. - V. 92. - P. 351-357.

(57)

1. Миниатюрный твердотопливный реактивный двигатель, изготавливаемый по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) из монокристаллического кремния,



ВУ 21319 С1 2017.10.30

состоящий из объединенных в матрицу модулей, каждый из которых включает блоки, содержащие камеру сгорания, заполненную топливом, сопло и устройство поджига топлива, **отличающийся** тем, что каждая камера сгорания и сопло выполнены в виде единого блока, содержащего два одинаковых элемента, каждый из которых включает половину камеры сгорания и сопла, а устройство поджига топлива выполнено в виде отдельного модуля, расположенного с торца блока камеры сгорания и сопла со стороны камеры сгорания.

2. Способ изготовления миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя по п. 1, при котором каждый блок камеры сгорания и сопла собирают посредством непосредственного термокомпрессионного соединения двух одинаковых профилированных элементов профилированными сторонами друг к другу, каждый из которых включает в себя половину камеры сгорания и сопла, причем каждый упомянутый элемент изготавливают одновременно в объеме одной пластины монокристаллического кремния с дырочным либо электронным типом проводимости, удельным сопротивлением от 0,005 до 20 Ом·см, кристаллографической ориентацией (100), или (111), или (110) и толщиной до 1 мм посредством создания углублений по рисунку, заданному фотолитографической маской, посредством формирования слоя пористого кремния с последующим его жидкостным химическим травлением либо методом анизотропного химического травления в щелочном растворе и вырезают из пластины монокристаллического кремния посредством сквозной резки пластины, а устройство поджига топлива изготавливают на другой пластине монокристаллического кремния дырочного либо электронного типа проводимости произвольных удельного сопротивления, кристаллографической ориентации и толщины в виде расположенных на тонком слое диэлектрического материала тонкопленочных резисторов из поликристаллического кремния с геометрией, заданной селективным травлением через фотолитографическую маску, электрический контакт к которым осуществляют посредством слоя металлизации с конфигурацией, заданной травлением слоя металла через другую фотолитографическую маску, вырезают из пластины монокристаллического кремния посредством сквозной резки пластины и присоединяют полученные устройства поджига топлива к блоку камеры сгорания и сопла со стороны камеры сгорания.

3. Способ по п. 2, **отличающийся** тем, что каждую камеру сгорания заполняют топливом, в качестве которого применяют жидкий полимеризуемый состав, со стороны камеры сгорания до подсоединения модуля устройства поджига топлива при помощи иглообразного инжектора таким образом, чтобы вдоль оси симметрии камеры сгорания оставался свободный от топлива канал.

4. Способ по п. 2, **отличающийся** тем, что модули блоков камеры сгорания и сопла и модули устройств поджига топлива соединяют в матрицу произвольной размерности путем последовательного соединения профилированных сторон модулей посредством непосредственного термокомпрессионного соединения либо через промежуточный слой силиката натрия, или оксида кремния, или нитрида кремния, или алюминия, или клея.

Данное изобретение относится к области миниатюрных реактивных двигателей и технологии их изготовления.

Для управления местоположением на орбите малогабаритных спутников используются миниатюрные реактивные двигатели, обеспечивающие тяговые импульсы величиной до 100 мН·с. В настоящее время существуют различные типы миниатюрных реактивных двигателей, различающиеся по принципам работы и видам используемого топлива. Среди них можно выделить жидкостные реактивные двигатели, ионные, твердотопливные. Данные двигатели при использовании их в составе малогабаритных спутников должны иметь небольшие размеры, небольшой вес и развивать требуемую силу тяги и тяговый импульс.

Для осуществления отдельных процедур маневрирования, таких как корректировка траектории движения, поворот или изменение орбиты, целесообразно использовать одно-

разовые твердотопливные миниатюрные реактивные двигатели. Необходимую суммарную величину импульса можно набирать последовательным или одновременным запуском (срабатыванием) нескольких одноразовых твердотельных миниатюрных двигателей. При этом необходимое количество одноразовых двигателей может быть изготовлено в виде одного цельного блока - матрицы. Однократное использование двигателя компенсируется отсутствием сложных систем управления мощностью, подачей топлива, насосов и клапанов и, следовательно, повышенной надежностью, меньшими габаритами и весом. В качестве топлива таких одноразовых двигателей выгодно использовать твердые вещества (полимеры), как обладающие наибольшей удельной энергией.

Использование микроэлектронной технологии микроэлектромеханических устройств (МЭМС технологии) для изготовления миниатюрных реактивных двигателей на пластинах монокристаллического кремния позволяет упростить процесс изготовления и снизить стоимость единичного двигателя, а также создавать матрицы из большого числа двигателей с воспроизводимыми и одинаковыми характеристиками, при сравнительно низкой стоимости и высокой надежности. Кремниевая МЭМС технология позволяет также интегрировать электрическую схему управления в непосредственной близости от двигателей, заметно сокращая необходимое количество электрических соединений.

Существующие варианты конструкций миниатюрных твердотопливных реактивных двигателей, изготавливаемых по МЭМС технологии, по способу изготовления камеры для хранения топлива можно разделить на вертикальные, в которых резервуар выполняется перпендикулярно плоскости кремниевой пластины, и горизонтальные - резервуар расположен параллельно плоскости пластины.

Известна вертикальная конструкция массива миниатюрных одноразовых реактивных двигателей [1], выполненная по кремниевой МЭМС технологии (фиг. 1). Каждый миниатюрный ракетный двигатель представляет собой двухсекционную ячейку. Внутри нижней секции 1 расположены воспламенители 2, после срабатывания которых происходит разрыв диафрагм 3 и поджиг топлива в верхней секции соответствующей камеры 4. После чего происходит выброс продуктов горения и газов через верхнюю часть камеры. Нагреватели изготовлены из резистивного металла, покрытого стифнатом свинца. Диафрагмой является тонкая пленка нитрида кремния. В качестве материала топлива используется ацетат нитроцеллюлозы.

Описанная конструкция обладает рядом недостатков. Во-первых, данная конструкция включает два типа ячеек с разными видами топлива, что создает дополнительные технологические трудности при изготовлении устройства. Кроме того, объем вертикальной конструкции ограничен толщиной используемых пластин монокристаллического кремния, которая обычно не превышает 1 мм. Расположение воспламенителя снизу может вызвать выброс части топлива без его воспламенения. Отсутствие сопла снижает эффективность устройства.

Известна конструкция вертикального миниатюрного реактивного двигателя [2], отличающаяся от предыдущей описанной конструкции тем, что двигатель содержит один отсек, заполненный полимеризованным топливом 1 (фиг. 2). Поджиг топлива осуществляется при помощи резистивных нагревателей 2, расположенных в верхней части камеры. Для увеличения тягового импульса конструкция включает сопла 3. В качестве топлива используется вещество на основе глицидилазид полимера (ГАП).

Несмотря на увеличенную эффективность, данной конструкции присущи следующие недостатки. Ограниченные толщиной пластины размеры камеры хранения и сгорания топлива, неполное и неравномерное сгорание топлива из-за расположения нагревателей устройства поджига около сопла. Для сборки конструкции необходимо соединение и совмещение с высокой точностью не менее четырех отдельных деталей. Так как соединение деталей осуществляется при помощи эпоксидного клея, имеющего низкую термостойкость, то существует риск разгерметизации двигателя при нагреве во время работы.

При изготовлении устройства также используются дорогостоящие методы глубокого реактивного ионного травления (DRIE).

Наиболее близкой к предлагаемой конструкции является конструкция, предложенная в [3] (фиг. 3.1, 3.2). Данная конструкция является горизонтальной и выполняется с использованием пластин монокристаллического кремния. При этом в одной пластине 1 изготавливаются камера сгорания 2 и сопло 3, на другой пластине 4 располагается нагревательный элемент 5, служащий для поджига топлива. Нагревательный элемент помещен над местом стыка камеры сгорания и сопла. При его расположении в глубине камеры сгорания, на стороне, противоположной соплу, при воспламенении может происходить выброс значительного количества несгоревшего топлива.

Основным недостатком конструкции является необходимость использования дорогостоящего процесса глубокого реактивного ионного травления кремния. Расположение нагревательных элементов на боковых стенках камеры существенно затрудняет разводку металлических проводников. Кроме того, даже небольшая асимметрия сопла может приводить к отклонению вектора тягового импульса двигателя от продольной оси двигателя.

Известно, что наиболее оптимальным способом заполнения камеры топливом является конфигурация, при которой в центре полимеризованного топлива имеется сквозное отверстие [4]. При этом воспламенение топлива производится с обратной стороны камеры. Разогретые газы, проходящие через отверстие в топливе, разогревают весь его объем, что приводит к более полному сгоранию топлива и более равномерному распределению импульса во времени. Благодаря этому возможность случайного прекращения горения топлива практически полностью исключается.

Задача данного изобретения - получение эффективного миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя, изготовленного по МЭМС технологии с использованием кремниевых пластин без применения дорогостоящих технологических методов, с возможностью выполнения его в виде матричного миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя выбранной размерности. Для решения данной задачи предлагается следующее.

1. Миниатюрный твердотопливный реактивный двигатель, изготавливаемый по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) из монокристаллического кремния, состоящий из объединенных в матрицу модулей, каждый из которых включает блоки, содержащие камеру сгорания, заполненную топливом, сопло и устройство поджига топлива, отличающийся тем, что каждая камера сгорания и сопло выполнены в виде единого блока, содержащего два одинаковых элемента, каждый из которых включает половину камеры сгорания и сопла, а устройство поджига топлива выполнено в виде отдельного модуля, расположенного с торца блока камеры сгорания и сопла со стороны камеры сгорания.

2. Способ изготовления миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя по п. 1, при котором каждый блок камеры сгорания и сопла собирают посредством непосредственного термокомпрессионного соединения двух одинаковых профилированных элементов профилированными сторонами друг к другу, каждый из которых включает в себя половину камеры сгорания и сопла, причем каждый упомянутый элемент изготавливают одновременно в объеме одной пластины монокристаллического кремния с дырочным либо электронным типом проводимости, удельным сопротивлением от 0,005 до 20 Ом·см, кристаллографической ориентацией (100), или (111), или (110) и толщиной до 1 мм посредством создания углублений по рисунку, заданному фотолитографической маской, посредством формирования слоя пористого кремния с последующим его жидкостным химическим травлением либо методом анизотропного химического травления в щелочном растворе и вырезают из пластины монокристаллического кремния посредством сквозной резки пластины, а устройство поджига топлива изготавливают на другой пластине монокристаллического кремния дырочного либо электронного типа проводимости произвольных удельного сопротивления, кристаллографической ориентации и толщины в виде расположенных на тонком слое диэлектрического материала тонкопленочных резисторов из поликристаллического кремния с геометрией, заданной селективным травлением через

фотолитографическую маску, электрический контакт к которым осуществляют посредством слоя металлизации с конфигурацией, заданной травлением слоя металла через другую фотолитографическую маску, вырезают из пластины монокристаллического кремния посредством сквозной резки пластины и присоединяют полученные устройства поджига топлива к блоку камеры сгорания и сопла со стороны камеры сгорания.

3. Способ по п. 2, отличающийся тем, что каждую камеру сгорания заполняют топливом, в качестве которого применяют жидкий полимеризуемый состав, со стороны камеры сгорания до подсоединения модуля устройства поджига топлива при помощи иглообразного инжектора таким образом, чтобы вдоль оси симметрии камеры сгорания оставался свободный от топлива канал.

4. Способ по п. 2, отличающийся тем, что модули блоков камеры сгорания и сопла и модули устройств поджига топлива соединяют в матрицу произвольной размерности путем последовательного соединения профилированных сторон модулей посредством непосредственного термокомпрессионного соединения либо через промежуточный слой силиката натрия, или оксида кремния, или нитрида кремния, или алюминия, или клея.

Конструкция миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя (матричного миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя размерностью 1x1) по предложенному способу представлена на фиг. 4.1 и 4.2. Она включает два одинаковых профилированных элемента 1, в каждом из которых сформированы части камеры сгорания 2 и сопла 3. Со стороны камеры сгорания блока камеры сгорания и сопла присоединено устройство поджига топлива 4, с расположенным на нем со стороны камеры сгорания нагревательным элементом 5. Камера сгорания двигателя 2 заполнена твердым топливом 6 таким образом, чтобы вдоль оси двигателя оставался открытый канал 7.

Для реализации описанной конструкции предлагается способ, состоящий в том, что в подложке из монокристаллического кремния по рисунку, заданному маской из нитрида кремния, посредством формирования слоя пористого кремния с последующим его жидкостным химическим травлением либо методом анизотропного химического травления в щелочном растворе формируются углубления, являющиеся половинами каналов камер сгорания и сопел миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя. Два таких элемента соединяются друг с другом профилированными сторонами. Образующиеся таким образом камеры и сопла обладают симметрией относительно плоскости соединения, что способствует более равномерному истечению нагретого газа из сопла двигателя во время его работы.

На поверхности второй кремниевой подложки формируется устройство поджига топлива, представляющее собой тонкопленочные поликремниевые резисторы. Площадь и форма резисторов определяется выбранным поперечным сечением камеры сгорания. Устройство поджига подсоединяется к блоку камер сгорания и сопел посредством клеевого соединения со стороны камер сгорания.

Перед подсоединением устройства поджига камера сгорания заполняется топливом на основе ГАП при помощи специального иглообразного инжектора. Заполнение осуществляется со стороны камеры сгорания, расположенной вблизи сопла для избежания образования пустот (воздушных пузырей), учитывая также, что необходимо обеспечить непосредственный контакт топлива с присоединяемым устройством поджига. После полимеризации твердотопливного топлива инжектор извлекается. При этом в топливе остается канал, соответствующий размеру и форме использованного инжектора.

Далее приведена последовательность основных технологических операций производства миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя по предложенному способу.

Фиг. 1 - конструкция двухсекционного вертикального миниатюрного реактивного двигателя, предложенная в [1].

Фиг. 2 - конструкция односекционного вертикального миниатюрного реактивного двигателя, предложенная в [2].

Фиг. 3.1 - конструкция горизонтального миниатюрного реактивного двигателя, предложенная в [3], вид сверху.

Фиг. 3.2 - конструкция горизонтального миниатюрного реактивного двигателя, предложенная в [3], разрез.

Фиг. 4.1 - конструкция миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя по предложенному способу, поперечный разрез.

Фиг. 4.2 - конструкция миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя по предложенному способу, вид сверху.

Фиг. 5 - подложка монокристаллического кремния с нанесенным первым маскирующим слоем и первым слоем фоторезиста.

Фиг. 6.1 - разрез подложки монокристаллического кремния с нанесенным маскирующим слоем и фоторезистом, с нанесенным рисунком входного отверстия сопла после вскрытия фоторезиста и травления маскирующего слоя.

Фиг. 6.2 - вид сверху подложки монокристаллического кремния с нанесенным маскирующим слоем и фоторезистом, с нанесенным рисунком входного отверстия сопла после вскрытия фоторезиста и травления маскирующего слоя.

Фиг. 7 - подложка монокристаллического кремния после удаления первого слоя фоторезиста с нанесенным вторым маскирующим слоем и вторым слоем фоторезиста.

Фиг. 8.1 - разрез подложки монокристаллического кремния с нанесенным рисунком камер сгорания и сопла после вскрытия фоторезиста и травления маскирующего слоя.

Фиг. 8.2 - вид сверху подложки монокристаллического кремния с нанесенным рисунком камер сгорания и сопла после вскрытия фоторезиста и травления маскирующего слоя.

Фиг. 9 - подложка монокристаллического кремния с удаленным вторым слоем фоторезиста и со сформированным слоем пористого кремния в области камер сгорания и сопла.

Фиг. 10.1. - разрез подложки монокристаллического кремния после удаления второго маскирующего слоя.

Фиг. 10.2 - вид сверху подложки монокристаллического кремния после удаления второго маскирующего слоя.

Фиг. 11 - подложка монокристаллического кремния со сформированным по всей площади блока камер сгорания и сопел вторым тонким слоем пористого кремния.

Фиг. 12.1 - разрез элемента блока камер сгорания и сопел после травления пористого кремния и скрайбирования.

Фиг. 12.2 - вид сверху элемента блока камер сгорания и сопел после травления пористого кремния и скрайбирования.

Фиг. 13 - подложка монокристаллического кремния с нанесенным последовательно диэлектрическим слоем, слоем поликристаллического кремния и первым слоем фоторезиста.

Фиг. 14.1 - разрез подложки монокристаллического кремния с фиг. 9. после процесса фотолитографии и селективного травления слоя поликристаллического кремния.

Фиг. 14.2 - вид сверху подложки монокристаллического кремния с фиг. 9. после процесса фотолитографии и селективного травления слоя поликристаллического кремния.

Фиг. 15 - подложка монокристаллического кремния после удаления первого слоя фоторезиста.

Фиг. 16.1 - разрез подложки монокристаллического кремния после напыления слоя металлизации и нанесения второго слоя фоторезиста.

Фиг. 16.2 - вид сверху подложки монокристаллического кремния после напыления слоя металлизации и нанесения второго слоя фоторезиста.

Фиг. 17 - пластина монокристаллического кремния после удаления второго слоя фоторезиста.

Фиг. 18 - соединение двух элементов блока камер сгорания и сопел.

Фиг. 19 - заполнение топливом блока камер сгорания и сопел.

Фиг. 20 - соединения блока камер сгорания и сопел с устройством поджига топлива.

ВУ 21319 С1 2017.10.30

Фиг. 21 - пластина монокристаллического кремния с расположенными на ней элементами четырех модулей блоков камер сгорания и сопел по пять в каждом.

Фиг. 22 - пластина монокристаллического кремния с расположенными на ней восемью матрицами устройств поджига топлива для матричных миниатюрных ракетных двигателей размерностью 5x5.

Фиг. 23 - собранный матричный миниатюрный твердотопливный реактивный двигатель размерностью 5x5 блоков камер сгорания и сопел с подсоединяемой матрицей устройств поджига топлива соответствующей размерности.

На фиг. 5-12 приведена последовательность технологических операций процесса изготовления элемента блока камеры сгорания и сопла миниатюрного твердотопливного ракетного двигателя.

В качестве исходной подложки 1 используют пластины монокристаллического кремния с дырочным либо электронным типом проводимости, удельным сопротивлением от 0,005 до 20 Ом·см и кристаллографической ориентацией (100), (111) или (110), толщиной до 1 мм. На обе стороны подложки наносят слой маскирующего материала 2, например, нитрида кремния, оксида кремния, металла, толщиной 0,1-1 мкм. На рабочую сторону подложки с маскирующим слоем наносят первый слой фоторезиста 3 (фиг. 5). При помощи процесса фотолитографии в нитриде кремния на рабочей стороне подложки формируют рисунок входного отверстия сопла миниатюрного твердотопливного ракетного двигателя (фиг. 6.1, 6.2). Далее по всей поверхности пластины монокристаллического кремния формируют второй маскирующий слой 4, например нитрида кремния, оксида кремния, металла, также толщиной 0,1-1 мкм и наносят слой фоторезиста 5 (фиг. 7). При помощи процесса фотолитографии в маскирующем слое 4 формируют рисунок камеры сгорания и сопла миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя (фиг. 8.1, 8.2).

На следующем этапе в кремниевой пластине по рисунку, заданному нанесенными ранее маскирующими слоями, формируют углубления 6 толщиной 50-90 % от толщины пластины (фиг. 9). Для создания углублений может быть использован процесс электрохимического анодирования в режиме формирования слоя пористого кремния с последующим его селективным травлением по отношению к подложке либо в режиме электрохимического травления (электрополировки). Анодирование проводят в водных и спиртосодержащих растворах, содержащих ионы фтора, например плавиковой кислоты, фторида аммония, с концентрацией фторионосодержащего вещества от 1 до 45 %, при плотностях тока от 10 до 150 мА/см². Для обеспечения электрического контакта перед анодированием маскирующий слой на обратной стороне пластины удаляют. Также для создания углублений допустимо использовать процесс химического анизотропного либо изотропного травления кремния, либо глубокого реактивного ионного травления. В этом случае маскирующий слой на обратной стороне не удаляют.

После формирования углублений второй маскирующий слой 4 селективно удаляют, оставляя первый слой 2. При этом открывается область, соответствующая входному отверстию сопла (фиг. 10.1, 10.2), области, соответствующие камере сгорания и соплу, также остаются открытыми. После этого при помощи методов, описанных выше, осуществляют травление на глубину, соответствующую выбранной глубине входного отверстия сопла (фиг. 11). При этом формируется объединенная область камеры сгорания и сопла 7. После указанных операций с поверхности подложки удаляют маскирующий слой 2.

Далее подложку скрайбируют и после разделения получают элементы блока камеры сгорания и сопла миниатюрного твердотопливного ракетного двигателя с открытыми с торцов каналами камеры сгорания и сопла (фиг. 12.1, 12.2).

На фиг. 13-17 приведена последовательность технологических операций процесса изготовления модуля устройства поджига топлива миниатюрного твердотопливного ракетного двигателя.

На подложку монокристаллического кремния 8 дырочного либо электронного типа проводимости произвольного удельного сопротивления, кристаллографической ориентации и толщины последовательно наносят диэлектрический слой 9 толщиной 0,1-1 мкм, в качестве которого может использоваться нитрид кремния или оксид кремния, слой поликристаллического кремния 10 с заданной электропроводностью толщиной 0,1-1 мкм и первый слой фоторезиста 11 (фиг. 13). В слое фоторезиста методом фотолитографии формируют рисунок, определяющий геометрию резистивных элементов устройства поджига. Резистивные элементы устройства поджига могут быть выполнены в виде одной полоски, нескольких параллельных полос, меандра или любой другой конфигурации, не указанной здесь. Через вскрытые в фоторезисте окна осуществляют селективное травление слоя поликристаллического кремния (фиг. 14.1, 14.2). Далее слой фоторезиста удаляют (фиг. 15).

На поверхность подложки производят осаждение сплошного слоя металла с высокой электропроводностью (например, алюминий, золото, тантал). После этого наносят слой фоторезиста 13, в котором методом фотолитографии формируют рисунок, задающий конфигурацию металлизации 12, обеспечивающей электрический контакт к резистивным элементам устройства поджига (фиг. 16.1, 16.2). Через вскрытые окна в фоторезистивной маске производят травление металла до подложки. После удаления слоя фоторезиста и скрайбирования подложку разделяют на модули (фиг. 17).

На фиг. 18-20 показана последовательность технологических операций сборки отдельных элементов в миниатюрный твердотопливный реактивный двигатель (матричный миниатюрный твердотопливный реактивный двигатель размерностью 1x1).

Два одинаковых элемента блока камеры сгорания и сопла 14 и 15 соединяют методом непосредственного компрессионного сплавления, либо через промежуточный слой силиката натрия, оксида кремния, нитрида кремния, алюминия, золота, керамического высокотемпературного клея и других, не указанных здесь, известных способов соединения кремниевых пластин, друг с другом теми сторонами, в которых сделаны углубления (фиг. 18). Изготовленный таким образом блок камеры сгорания и сопла 16 заполняют топливом 17 на основе ГАП при помощи иглообразного инжектора таким образом, чтобы заполнение топливом осуществлялось от расположенной около сопла области канала камеры сгорания (фиг. 19). Инжектор 18 представляет собой цилиндрическую трубку, либо трубку другого сечения (звездообразного, якоревидного, квадратного), закрытую с одного конца. В непосредственной близости от закрытого конца в боковых стенках трубки расположены отверстия, через которые поступает топливо в камеру сгорания в процессе заполнения. При заполнении инжектор помещают строго вдоль оси симметрии камеры сгорания и закрытым концом приводят в контакт со стенкой камеры сгорания, расположенной вблизи сопла, при этом жерло сопла должно полностью перекрываться инжектором, чтобы в него не попадало топливо. Подачу топлива производят до полного заполнения камеры сгорания. Извлечение инжектора осуществляют после полимеризации топлива.

После полимеризации топлива к блоку камеры сгорания и сопла 16 со стороны открытого конца камер сгорания подсоединяют устройство поджига топлива 19 (фиг. 20). Для этого используют метод соединения через промежуточный слой силиката натрия, керамического клея и другие известные методы, позволяющие соединять детали из кремния.

Одновременно на одной подложке могут быть изготовлены элементы нескольких элементов блоков камеры сгорания и сопла, которые могут быть сгруппированы в модули произвольной размерности. На фиг. 21 показан способ размещения четырех модулей по 5 элементов блоков камеры сгорания и сопла на пластинах монокристаллического кремния диаметром 100 мм. На фиг. 22 показан способ размещения матриц устройств поджига топлива для матричного миниатюрного ракетного двигателя размерностью 5x5. Собранные из двух модулей блоки камер сгорания и сопел также могут быть объединены в матрицы произвольной размерности. Соединение отдельных блоков камер сгорания и сопел в матрицы осуществляют методом непосредственного компрессионного сплавления, либо через

промежуточный слой силиката натрия, оксида кремния, нитрида кремния, алюминия, клея. На фиг. 23 показана собранная матрица размерностью 5x5 блоков камер сгорания и сопел, к которой со стороны открытых концов камер сгорания подсоединяется модуль устройств поджига топлива. Для облегчения подсоединения модуля устройств поджига топлива торцевая часть собранной матрицы может быть дополнительно планаризована путем механической полировки.

Пример 1.

Изготовление матричного миниатюрного твердотопливного реактивного двигателя размерностью 5x5.

Исходной подложкой для изготовления модулей блока камер сгорания и сопел является пластина монокристаллического кремния КЭС-0,01, с кристаллографической ориентацией (100), диаметром 100 мм и толщиной 920 мкм. Методом термического окисления на обеих сторонах пластины формируется адгезионный слой оксида кремния толщиной 0,05 мкм, после чего на обе стороны пластины методом CVD наносится первый слой нитрида кремния толщиной 0,22 мкм. Фотолитография входного отверстия сопел размерами 200x1000 мкм производится с использованием позитивного фоторезиста AZ-1518, через открытые окна в маске производится плазмохимическое травление нитрида до оксида кремния. После удаления фоторезиста, осуществляется нанесение второго слоя нитрида кремния. При помощи второго процесса фотолитографии на втором слое нитрида кремния формируется рисунок сопел и камеры сгорания. Размер камеры сгорания составляет 3x25 мм. Рисунок сопла имеет трапецевидную форму с размерами оснований 200 мкм и 1000 мкм и высотой 2000 мкм. После этого проводится локальное плазмохимическое травление двух слоев нитрида кремния до подслоя оксида кремния. Для обеспечения электрического контакта производится также снятие нитрида кремния с обратной стороны пластины. Анодная обработка рабочей стороны пластины осуществляется в растворе состава $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ (1:3:1) в течение 160 мин при плотности тока 70 mA/cm^2 . Толщина сформированного слоя пористого кремния составляет 480 мкм. Селективное удаление верхнего слоя нитрида кремния производится при 45 % растворе фтористоводородной кислоты в течение 15 минут. Процесс второго анодирования проводится в растворе состава $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ (1:3:1) в течение 7 мин при плотности тока 70 mA/cm^2 . Толщина второго слоя пористого кремния составляет 20 мкм. Селективное травление пористого кремния производится в 5 % растворе КОН при температуре 50 °С. После этого производится сквозная резка пластины и разделение ее на модули размером 25x35 мм.

Исходной подложкой для изготовления устройства поджига топлива является пластина монокристаллического кремния КДБ-20, с кристаллографической ориентацией (100), диаметром 100 мм стандартной толщины. На первом этапе на лицевой стороне пластины проводится нанесение слоя БФСС толщиной 0,8 мкм, используемого в качестве термического изолятора. Для формирования нагревательных элементов на слой БФСС производится нанесение слоя поликристаллического кремния толщиной 0,45 мкм. С использованием позитивного фоторезиста AZ-1518 производится формирование рисунка нагревательных элементов. Нагревательный элемент представляет собой 10 параллельно соединенных полосок шириной 20 мкм, длиной 300 мкм, расположенных на расстоянии 20 мкм. Для формирования контактов к нагревательным элементам на рабочую сторону пластины производится напыление слоя алюминия толщиной 0,5 мкм. Методом фотолитографии на поверхности алюминия формируется рисунок контактов. На следующем этапе осуществляется селективное травление алюминия в местах, не защищенных маской. Для травления алюминия используется раствор, содержащий по массе 80 % H_3PO_4 , 5 % HNO_3 , 5 % CH_3COOH и 10 % деионизованной воды. После этого производится сквозная резка пластины и разделение ее на модули.

Сборка матрицы блоков камер сгорания и сопел осуществляется при помощи непосредственного термокомпрессионного соединения (сплавления) кремниевых пластин. Ра-

боты по соединению проводятся в чистой зоне класса 100 и выше. Перед соединением модулей блока камер сгорания и сопел производится удаление нитрида кремния с их поверхности в 45 % растворе плавиковой кислоты в течение 15 мин. Далее осуществляется промывка модулей в проточной деионизованной воде в течение 10 мин. Для активации поверхности кремния проводится обработка в перекисно-аммиачном растворе состава $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 0,5:1:5$. После активации производится сушка на центрифуге, совмещение и сжатие элементов блока камер сгорания и сопел с давлением 5 кг. Последующая термообработка включает в себя две стадии. Первая стадия - отжиг при температуре 350 °С на воздухе в течение 30 мин под давлением. Вторая стадия - отжиг при температуре 1000 °С на воздухе в течение 10 мин без приложения давления. После термообработки производится заполнение камер сгорания топливом на основе ГАП с использованием инжектора. После полимеризации топлива осуществляется полировка торцевой плоскости, на которой расположены отверстия открытых концов камер сгорания. К этой плоскости при помощи керамического клея Aremco Ceramabond 618N присоединяется блок устройств поджига топлива. Сушка клеевого соединения осуществляется в течение 24 ч при комнатной температуре.

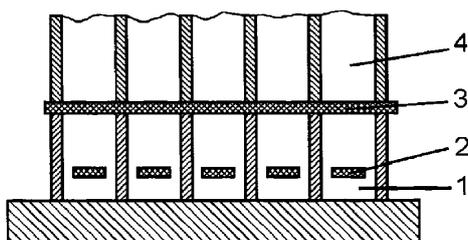
Источники информации:

1. Патент США 6 378 292, МПК В64G 1/22, В64G 1/40, С06В 45/00, F02К 9/76, F02К 9/00, F02К 9/94, В64G 1/26, В64G 1/24, F02К 009/42, F02К 009/44, F02К 009/95, F02К 009/76, 2002.

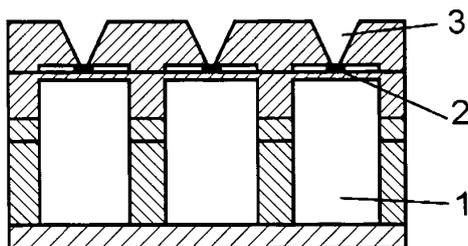
2. Rossi C., Briand D., Dumonteuil M., Camps T., Phuong Quyen Pham, de Rooij N.F. Matrix of 10×10 addressed solid propellant microthrusters: Review of the technologies // Sensors and Actuators A. - 2006. - Vol. 126. - P. 241-252.

3. Zhang K.L., Chou S.K., Ang S.S. Development of a solid propellant microthruster with chamber and nozzle etched on a wafer surface // J. Micromech. Microeng. - 2004. - Vol. 14. - P. 785-792.

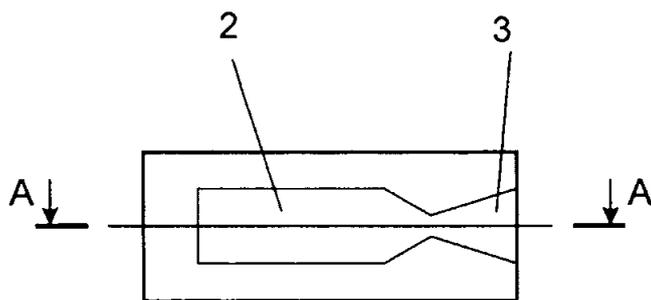
4. Brooks W.T. Solid propellant grain design and internal ballistics. National Aeronautics and Space Administration, Lewes Research Center (Design Criteria Office). - Cleveland: Lewes Research Center, 1972. - 102 p.



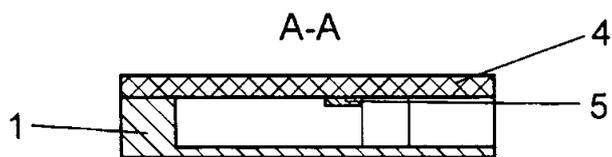
Фиг. 1



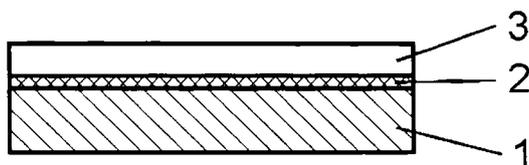
Фиг. 2



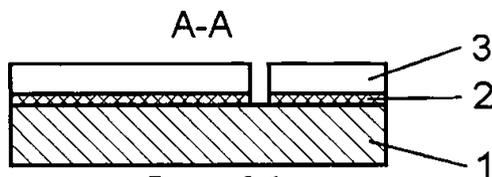
Фиг. 3.1



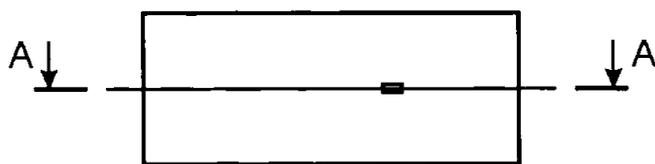
Фиг. 3.2



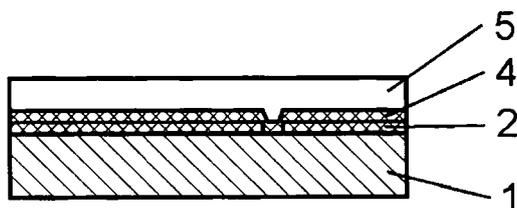
Фиг. 5



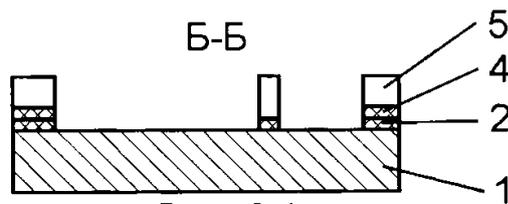
Фиг. 6.1



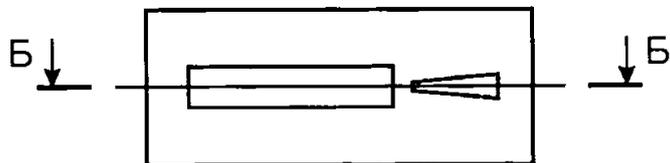
Фиг. 6.2



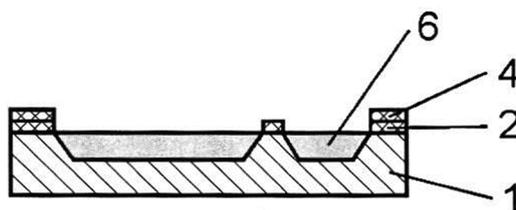
Фиг. 7



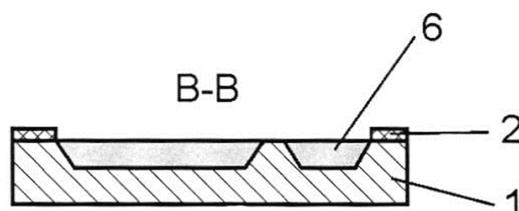
Фиг. 8.1



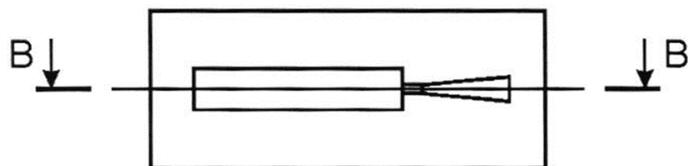
Фиг. 8.2



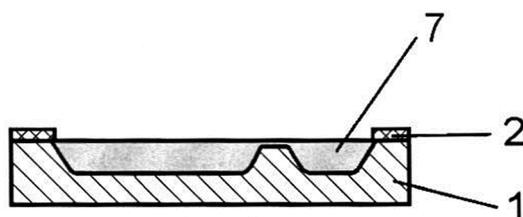
Фиг. 9



Фиг. 10.1



Фиг. 10.2

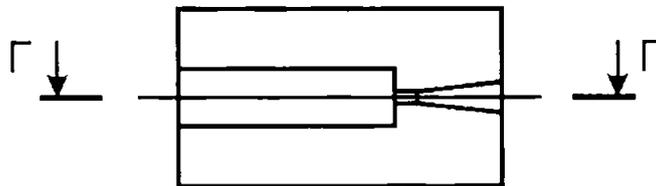


Фиг. 11

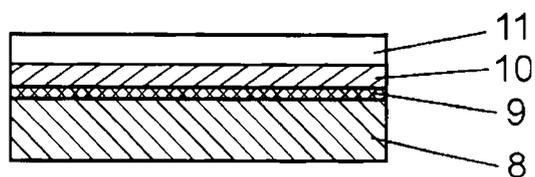
Г-Г



Фиг. 12.1

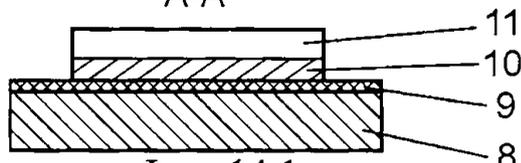


Фиг. 12.2

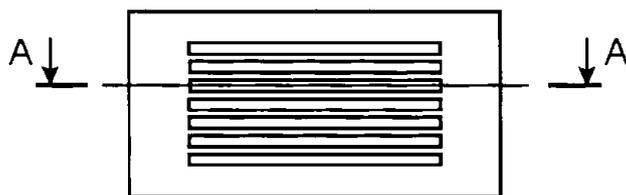


Фиг. 13

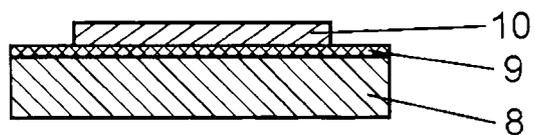
А-А



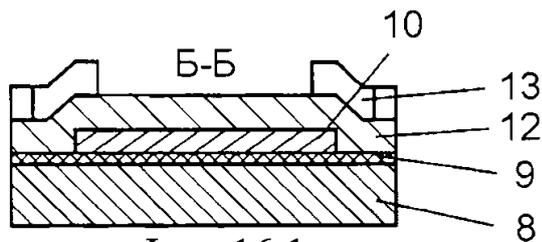
Фиг. 14.1



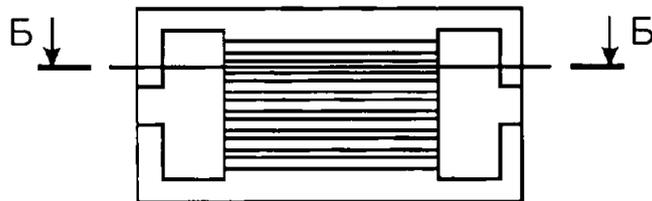
Фиг. 14.2



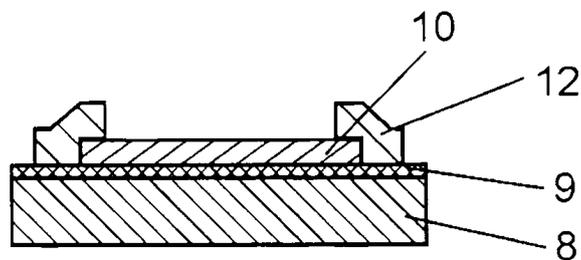
Фиг. 15



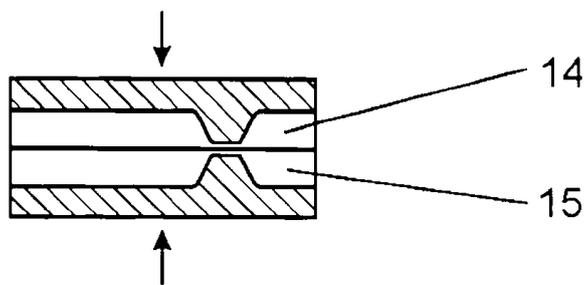
Фиг. 16.1



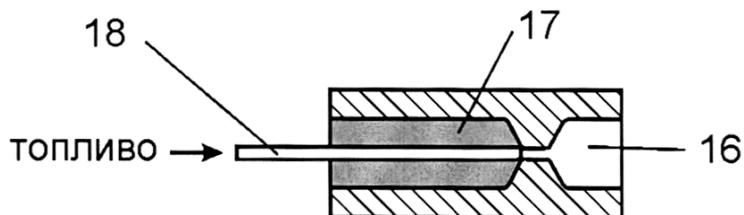
Фиг. 16.2



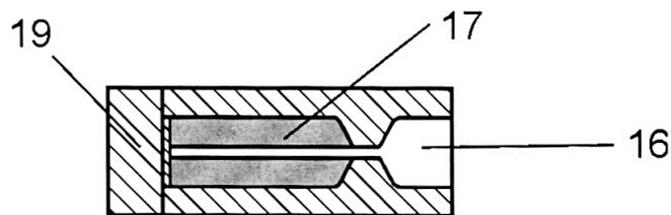
Фиг. 17



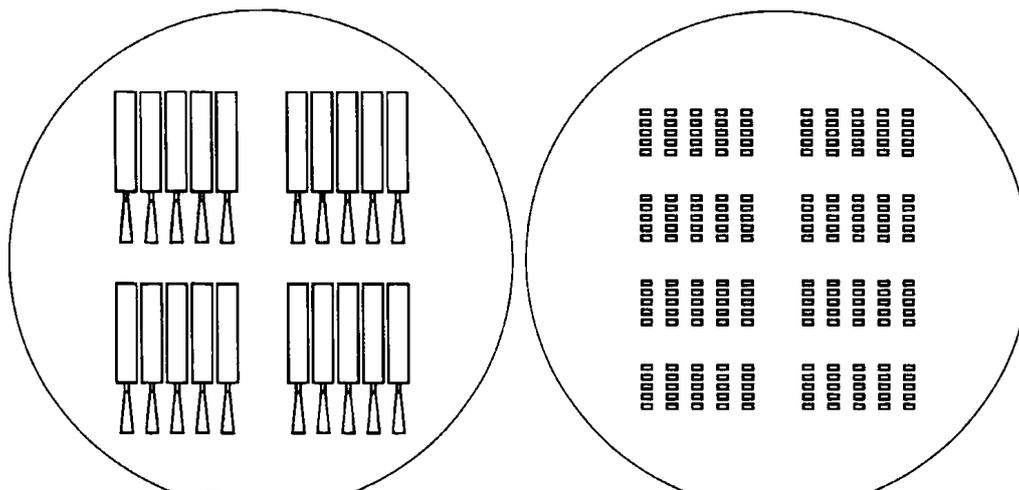
Фиг. 18



Фиг. 19

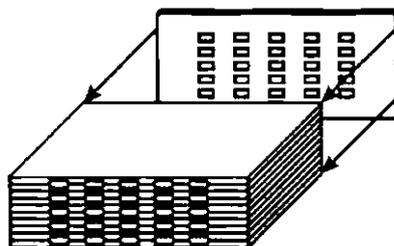


Фиг. 20



Фиг. 21

Фиг. 22



Фиг. 23