

ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МЭМС ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНО-ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Авторы: М.Ю. Жуков, к.т.н. И.В. Усталова, д.т.н. Е.В. Класс

Предохранительно-исполнительные механизмы на базе МЭМС являются устройствами нового поколения для изготовления взрывателей. Ключевыми особенностями являются микроминиатюрные размеры, возможность интеграции с электронными подсистемами взрывателей и устройствами воспламенения.

Введение

Предохранительно-исполнительные механизмы (ПИМ) используются во всех боеприпасах для управления передачей энергии от инициирующего взрывчатого вещества (ИВВ) к основному заряду при помощи подвижной шторки, прерывающей огневую цепь. При достижении боеприпасом требуемых условий для взведения (инерция покоя, центробежная сила, дальность, временная задержка ит.д.), ПИМ переводится из безопасного в боевое состояние и обеспечивает передачу энергии от заряда ИВВ к основному заряду. В то же время при нахождении ПИМ в не взведенном состоянии обеспечивается безопасность обращения с боеприпасами в процессе хранения и транспортировки. В большинстве механических взрывателей ПИМ является самым объемным компонентом. Традиционные механические ПИМ, как правило, используют для своей работы силы инерции или центробежные силы. Однако подобные устройства громоздки, сложны и дороги в производстве. Кроме того, в настоящее время во взрывательные устройства встраивают вспомогательные подсистемы (обмен данными с системами контроля, управление и наведение, программируемое время срабатывания, захват цели). В этой связи важной научно-технической задачей является миниатюризация ПИМ, которую можно решить при помощи использования микроэлектромеханических систем (МЭМС).

МЭМС ПИМ обладают следующими достоинствами:

- безопасность;
- возможность производства ПИМ совместно с воспламенителем;
- надежная работа в условиях больших перегрузок;
- уменьшение содержания редких и тяжелых металлов в конструкции взрывательного устройства;

- увеличение могущества боеприпаса за счет большего содержания взрывчатого вещества;

- уменьшение потерь личного состава вследствие несчастных случаев при обращении с боеприпасами.

1 Анализ существующих типов МЭМС ПИМ

1.1 МЭМС ПИМ с инерционным приводом

Первые разработки ПИМ, использующего инерцию покоя и центробежную силу для взведения на базе МЭМС, были сделаны в США в 2005 году в рамках программы разработки стрелково-гранатометного комплекса “Объективное пехотное боевое оружие” (OICW) для 25 мм гранатомета XM25 [1]. Устройство МЭМС ПИМ показано на рисунке 1.

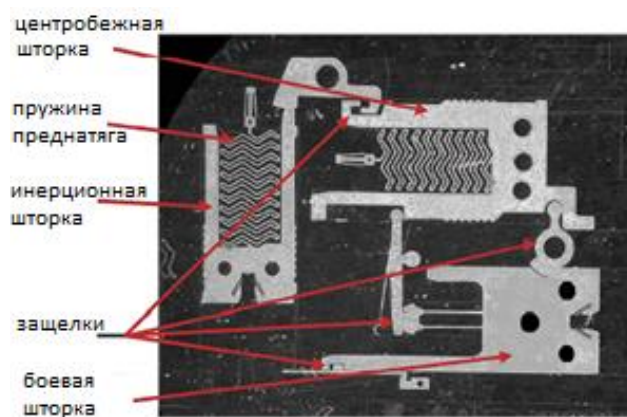


Рисунок 1 – Устройство МЭМС ПИМ с инерционным приводом [1]

Механизм состоит из неподвижной рамы, микропружин, подвижных шторок (инерционной и центробежной) и защелок. Устройство имеет две ступени предохранения и устройство дальнего взведения. ПИМ переводится во взведенное состояние только при совпадении двух последовательно следующих условий – ускорение и наличие центробежной силы. Устройство дальнего взведения представляет собой зигзагообразные насечки на основной шторке и раме. Возникающие при перемещении шторки из безопасного положения в боевое силы трения препятствуют быстрому ее движению, таким образом, переход шторки ПИМ в боевое состояние происходит на значительном удалении от стрелка, что исключает возможность преждевременного подрыва гранаты. Технология производства данного ПИМ – LIGA процесс (процесс рентгеновской литографии, микрогальваноластики и формовки) с

последующим плазмохимическим травлением. Микросборка производится на специальном стапеле.

Характерной особенностью LIGA процесса является использование толстых пленок рентгенрезиста, что препятствует достижению необходимой технологической точности при изготовлении мелких деталей. Для решения этой проблемы J. Renz [2] использовал процесс электрохимической фабрикации деталей (EFAB). Технология основана на использовании шаблонов из электроизоляционного материала для нанесения слоев металла двух типов: жертвенного и целевого, с последующим селективным травлением жертвенного металла. Метод отличается повышенной точностью изготовления (ширина линии составляет 10 мкм). Внешний вид ПИМ показан на рисунке 2.

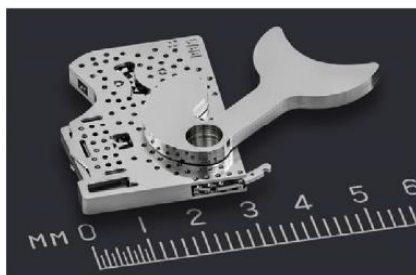


Рисунок 2 – Внешний вид ПИМ с инерционным приводом [2]

ПИМ состоит из рамы, в которой размещены механические элементы: защелка, выходящая из отверстия при воздействии ускорения при выстреле (I ступень предохранения), блокиратор шестеренчатого привода, разблокирующий шестерню при действии центробежных сил в момент движения снаряда по каналу ствола (II ступень предохранения), рычаг, связанный с часовым механизмом шпиндельного типа, обеспечивающий дальнейшее взведение. На рычаге находится промежуточный заряд азида свинца, который при взведении ПИМ перемещается в боевое положение. Принцип работы ПИМ представлен на рисунке 3.

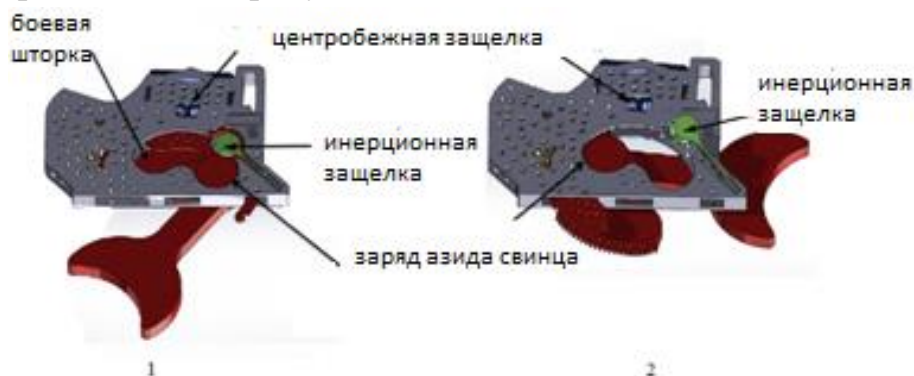


Рисунок 3 – Взаимное расположение деталей ПИМ: 1 – безопасное состояние, 2- боевое состояние [2]

Механизм выполнен из высокопрочного сплава никель-кобальт. Размеры корпуса ПИМ составляют 3×3 мм. Важной особенностью является возможность подстройки времени дальнего взведения для различных нарезных артиллерийских орудий путем замены составных частей шпиндельного часового механизма: шага шестерен, массы подвижного рычага и его длины. Взрыватель 40мм автоматического гранатомета, выполненный с использованием данного типа ПИМ, имеет размеры 10×15×10мм, что на 80% меньше, чем штатный взрыватель. Сравнительные размеры штатного взрывателя и взрывателя с МЭМС ПИМ приведены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Сравнение габаритов штатного взрывателя и взрывателя с МЭМС ПИМ [2]

Для снижения стоимости производства J. Jeong et al. в 2018 году использовали жидкостное химическое травление для создания механического МЭМС ПИМ [3]. Механизм состоит из рамы, двух блокираторов I и II ступеней предохранения (воспринимающего ускорение и центробежную силу при движении снаряда по каналу ствола) и редуктора с часовым механизмом шпиндельного типа для обеспечения дальнего взведения. Внешний вид механизма в безопасном и взведенном состоянии приведен на рисунке 5.

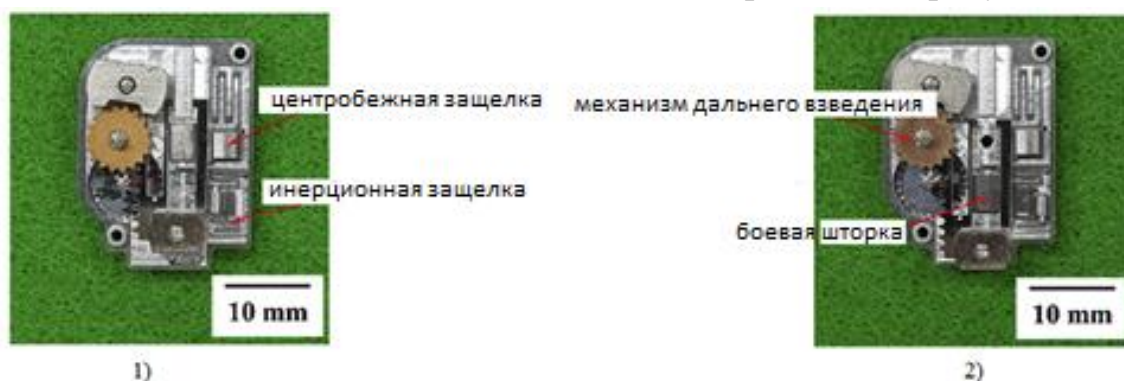


Рисунок 5 – Расположение деталей инерционного ПИМ:

1- безопасное состояние, 2 – взведенное состояние [3]

Редуктор приводит в действие шторку с грузиком при помощи зубчатой рейки. При выстреле, за счет ускорения, грузик I ступени предохранения выходит из своего гнезда и заклинивается в перекошенном положении за счет пружины, снимая при этом защелку. При возникающем центробежном ускорении грузик второй ступени предохранения перемещается, снимая защелку со шторки. В дальнейшем, грузик со шторкой за счет центробежных сил опускаются вниз, разблокируя огневую цепь. ПИМ имеет размеры 20x40x5мм. Принцип работы данного ПИМ показан на рисунке 6.



Рисунок 6 – Принцип работы инерционного ПИМ [3]

Рама, зубчатая рейка и шестерни выполнены из нержавеющей стали с использованием методов жидкостного химического травления. Использование подобного метода позволяет снизить стоимость производства при помощи групповой обработки большого количества деталей и не требует сложного специализированного оборудования, необходимого для LIGA и EFAB процессов.

В 2022 году Y.Qin et al. опубликована статья об изготовлении МЭМС ПИМ, использующего принцип воздействия ускорения и центробежных сил для взведения [4]. Внешний вид устройства приведен на рисунке 7.

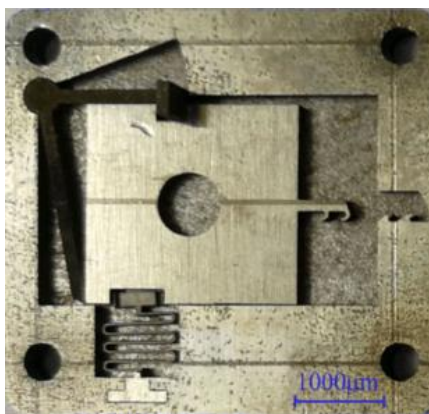


Рисунок 7 – Внешний вид инерционного МЭМС ПИМ [4]

Устройство изготовлено при помощи метода электроэрозионной обработки из нержавеющей стали и имеет размеры 4,8x4,6x0,8 мм.

1.2 МЭМС ПИМ с электромагнитным приводом

W. H. Maurer et al. разработали ПИМ, работающий на электромагнитном принципе, в 2006 году [5]. Механизм состоит из рамы, пружин, шторки и магнитных защелок, расположенных разными полюсами друг к другу. Устройство механизма показано на рисунке 8.

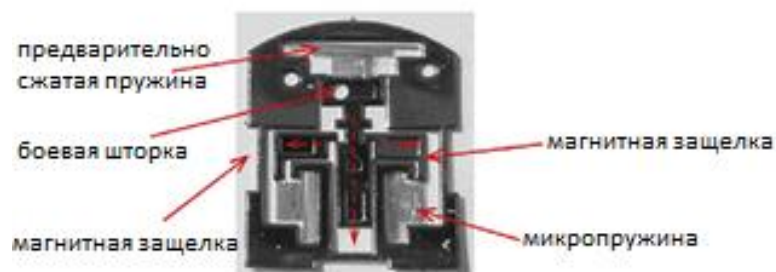


Рисунок 8 – Устройство электромагнитного ПИМ [5]

При достижении условий взведения ПИМ, система управления взрывателем подает электрический импульс на расположенную снаружи корпуса ПИМ катушку, что приводит к снятию защелок со шторки и ее перемещению в боевое положение при помощи предварительно сжатой пружины. Механизм выполнен из никеля при помощи LIGA-процесса и имеет размеры 12x12x0,8 мм.

Z. Wu et al. внесли некоторые изменения в механизм в 2010 году [6]. Механизм использует те же самые принципы электромагнитных сил для своей работы, однако шторка приводится в действие не предварительно сжатой пружиной, а электромагнитом. Устройство состоит из рамы, в которой

расположены две подпружиненные магнитные защелки, препятствующие перемещению подпружиненной шторки, два электромагнитных привода защелок и электромагнит привода шторки. При достижении условий взведения ПИМ, система управления взрывателем отдает команду на его перевод в боевое состояние и подает электрический импульс на катушки приводов защелки. Под действием электромагнитных сил, защелки выходят из зацепления со шторкой и освобождают ее, затем взрыватель подает импульс на электромагнит перемещения шторки и перемещает ее в боевое положение. Главными усовершенствованиями является отсутствие предварительно сжатых пружин и наличие нескольких электромагнитов, что повышает безопасность работы механизма, но снижает его надежность и увеличивает габариты. Схематическое устройство электромагнитного ПИМ приведено на рисунке 9.



Рисунок 9 – Схематическое устройство электромагнитного ПИМ [6]

Механизм выполнен при помощи LIGA процесса из никеля и имеет размер 13x13x20 мм. Так как электромагнитные ПИМ не используют для своей работы инерцию и центробежные силы, они применимы, в том числе, и для снарядов, не использующих для своей стабилизации центробежные силы. Однако из-за необходимости использования LIGA процесса, наличия электромагнитов они сложны в производстве, громоздки и дороги.

1.3 МЭМС ПИМ с пиротехническим приводом

Н. Rezous et al. в 2010 году разработали ПИМ с пиротехническим приводом состоящим из нескольких составных частей [7]. Механизм состоит из кремниевой электронной платы управления с встроенным пиротехническим актуатором и детонатором, верхней и нижней крышек из алюминия, шторки с отверстием из высокотемпературной керамики и предохранительной чеки. Система управления взрывателем отдает команду на срабатывание пиротехнического привода, который передвигает шторку в боевое положение. Для изготовления платы управления были использованы классические

технологии микроэлектроники: фотолитография, химическое осаждение из газовой фазы при низком давлении, стимулированное плазмой осаждение из газовой фазы, реактивное ионное травление. Габаритные размеры ПИМ составляют 10x10x10 мм. Принцип работы, устройство ПИМ и платы управления показаны на рисунке 10.

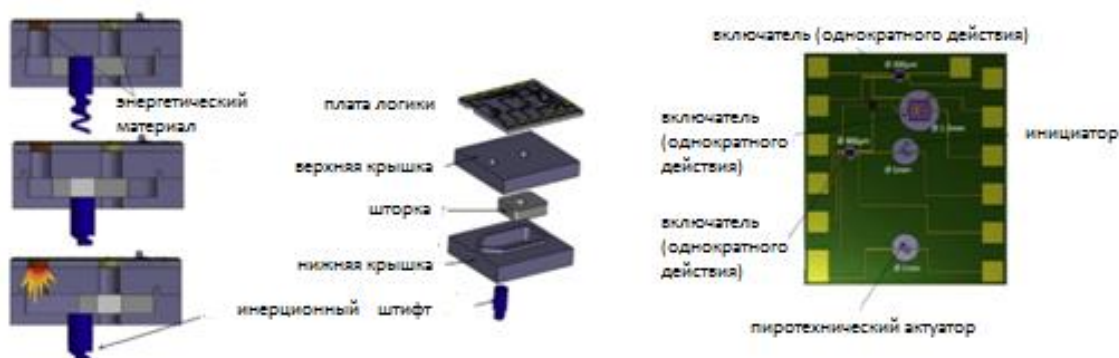


Рисунок 10 – ПИМ с пиротехническим приводом: принцип работы, схематическое устройство ПИМ и платы управления [7]

Zhu et al. представили в 2018 году МЭМС ПИМ с пиротехническим приводом, имеющий другое устройство [8]. Механизм состоит из стальной пластины с запрессованным воспламенительным передаточным зарядом, кремниевой шторки, закрепленной на раме перемычками, двух стальных пластинчатых пружин, рамы из низкотемпературной спеченной керамики, в которой находятся металлическая разводка и первичные воспламенители пиротехнического актуатора и воспламенительного заряда. В шторку запрессованы заряды пиротехнического актуатора и воспламенительного передаточного заряда. При подаче команды от системы управления взрывателем на взведение происходит срабатывание пиротехнического актуатора, давление газов разрушает перемычки и перемещает шторку в боевое положение, в крайнем положении пластинчатые пружины заходят в вырезы шторки и заклинивают ее. Шторка изготовлена из монокристаллического кремния при помощи стандартных операций технологии микроэлектроники. Разрез и внешний вид устройства представлен на рисунке 11.

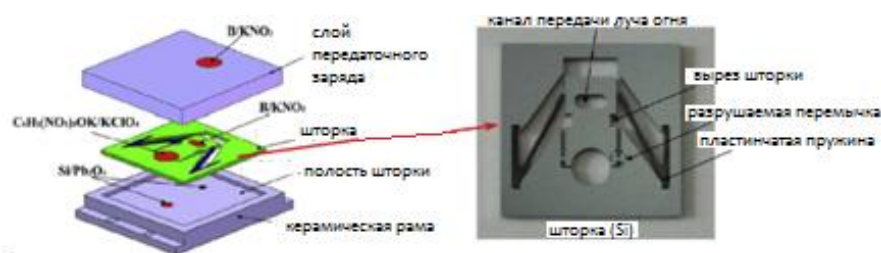


Рисунок 11 – Разрез и внешний вид ПИМ с пиротехническим приводом [8]

1.4 МЭМС ПИМ с электротермическим приводом

Схема работы электротермического актуатора представлена на рисунке 12.

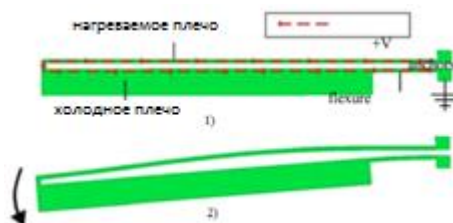


Рисунок 12 – Схема работы электротермического актуатора: 1 – без действия электрического тока, 2 – под действием электрического тока [9]

Электропроводящий рычаг, состоящий из двух плечей различной ширины, подключен к источнику тока, при пропускании через него электрического тока рычаг нагревается, что вызывает термическое расширение материала рычага, его удлинение и изгиб. R. Lake et al. разработали ПИМ с электротермическим приводом в 2010 году [9]. Механизм состоит из матрицы приводных электротермических приводов, приводной зубчатой рейки, зубчатого колеса, шторы с зубчатой рейкой, блокиратора вращения зубчатого колеса с термоэлектрическим актуатором, сделанных при помощи технологий тонкослойного селективного травления и осаждения. Микрофотография механизма показана на рисунке 13.

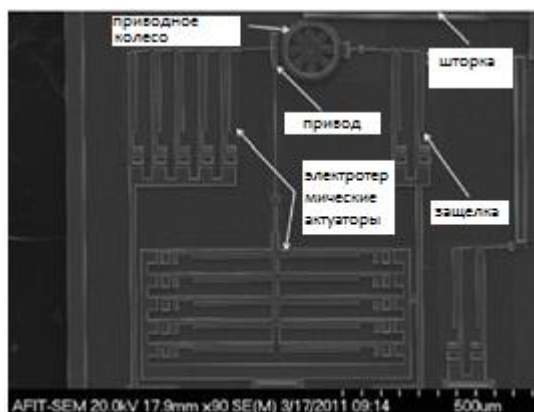


Рисунок 13 - Микрофотография МЭМС ПИМ с термоэлектрическим приводом[9]

Так как электротермический актуатор может перемещать зубчатое колесо только на несколько зубьев, для полного перемещения шторки требуется большое количество циклов нагрева и охлаждения, что достигается использованием пульсирующего тока. Принцип работы МЭМС ПИМ с электротермическим приводом представлен на рисунке 14.

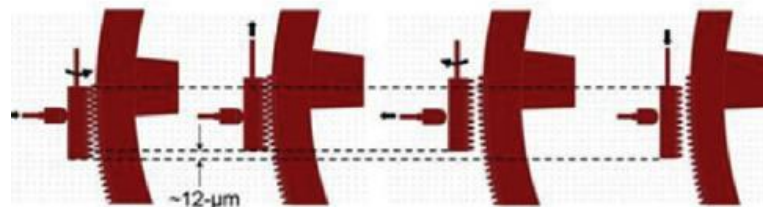


Рисунок 14 – Принцип работы МЭМС ПИМ с электротермическим приводом [9]

Таким образом, время перемещения шторки может быть изменено при помощи изменения частоты импульсов, в работе показано [9], что при частоте 250 Гц, полное перемещение шторки на расстояние 785 мкм занимает 325 мс. Приведение ПИМ в действие при помощи импульсов значительно снижает вероятность случайного срабатывания.

Х. Zhou et al. в 2017 году разработали электротермический МЭМС ПИМ, предназначенный для лазерного инициирования [10]. Механизм представляет собой 2 оптических волокна: подвижное с электротермическим приводом и неподвижное. В безопасном состоянии волокна не соединены и лазерный луч не может достигнуть детонатора, при переводе в боевое состояние, термоэлектрический привод перемещает подвижное волокно таким образом,

чтобы лазерный луч мог беспрепятственно проходить через подвижное волокно в неподвижное. Принцип работы представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 – Принцип работы электротермического ПИМ для лазерного инициирования: 1 – безопасное состояние, 2- боевое состояние [10]

Время срабатывания такого МЭМС ПИМ составляет 19 мс, КПД волокна составляет 92,7%, что для лазера с выходной мощностью 3000 мВт составляет 2780 мВт.

Электротермические устройства, созданные на базе кремниевой технологии, имеют микроминиатюрные размеры, малое время срабатывания, возможность интеграции в схемы контроля, управления и обработки информации. Однако кремний достаточно хрупкий материал, кремниевая шторка не может противостоять случайному срабатыванию детонатора, поэтому имеет ограниченное применение в ПИМ.

Для увеличения стойкости к случайному срабатыванию, T. Hu et al. разработан МЭМС ПИМ, имеющий комбинированную кремниевую шторку с нанесенным при помощи электрохимического осаждения слоем никеля толщиной 300 мкм [11]. Комбинированная шторка показана на рисунке 16.

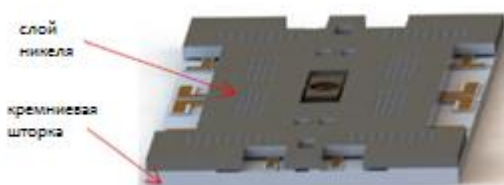


Рисунок 16 – Комбинированная шторка кремний-никель[11]

Под действием переменного напряжения в 11 вольт, при помощи восьми электротермических приводов, шторка может быть плавно перемещена из безопасного положения в боевое. Тесты на случайное срабатывание показали эффективность решения с комбинированной шторкой.

К.Wang et al. разработали в 2021 году многослойный электротермический МЭМС ПИМ, имеющий в своем составе две двухсегментные шторки, расположенные в разных слоях [12]. По команде от системы управления взрывателем, шторки при помощи V-образных электротермических актуаторов раздвигаются и ПИМ переходит в боевое положение. Устройство выполнено на двух пластинах “кремний на изоляторе” и имеет размеры 8,5x8,5x0,9 мм. Вид в разрезе данного МЭМС ПИМ показаны на рисунке 17.

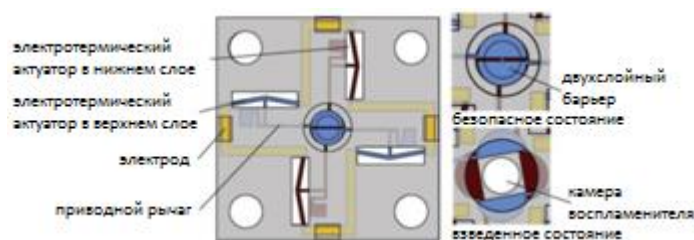


Рисунок 17 – Вид в разрезе электротермического МЭМС ПИМ [12]

ПИМ был использован для создания взрывателя с интегрированным металлостеклянным воспламенителем, имеющим в своем составе нихромовый тонкопленочный мостик накала размером 380x380 мкм с нанотермитным тонкопленочным покрытием. Устройство воспламенителя показано на рисунке 18.



Рисунок 18 – Устройство интегрированного воспламенителя МЭМС ПИМ [12]

Помимо воспламенителя, МЭМС ПИМ был оснащен интегрированным детонатором из стифната свинца.

Габаритные размеры взрывателя составляют 13,4x8,5x5,2 мм. Внешний вид взрывателя, смонтированного на переходной плате, показан на рисунке 19.

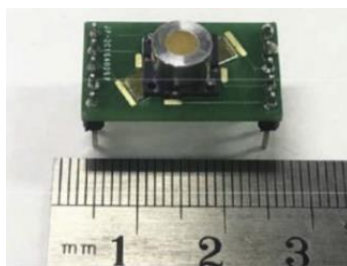


Рисунок 19 – Внешний вид взрывателя на основе электротермического МЭМС ПИМ [12]

Т. Ни в 2021 году разработал однослойный электротермический МЭМС ПИМ с перемещающейся шторкой [13]. Приборный слой представляет собой массивы V-образных электротермических актуаторов, связанных рычагами с зубчатыми рейками на конце, один из которых при срабатывании актуатора входит в зацепление и перемещает подвижную шторку на один шаг зубчатой рейки, расположенной на шторке, тогда как другой выходит из зацепления и разблокирует шторку для обеспечения ее перемещения. Для полного перемещения шторки необходимо повторение 4 шагов перемещения.

Подробно устройство активного слоя МЭМС данного ПИМ рассмотрено на рисунке 20.

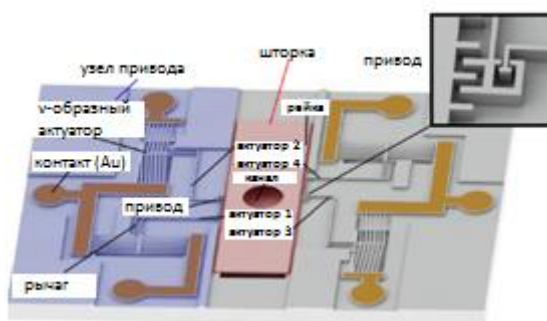


Рисунок 20 – Устройство активного МЭМС слоя электротермического ПИМ [13]

Механизм имеет интегрированный металлостеклянный воспламенитель со структурой указанной на рисунке 18. Габариты механизма с интегрированным воспламенителем составляют 11x12x1,2 мм. Вид механизма в разрезе и принцип работы представлены на рисунке 21.

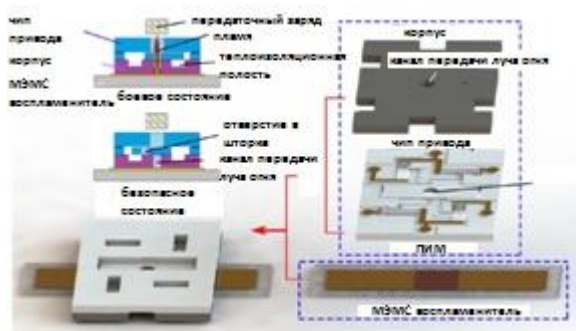


Рисунок 21 – Принцип работы и вид в разрезе механизма электротермического ПИМ [13]

Важной и актуальной проблемой является обеспечение нечувствительности ПИМ к электромагнитным воздействиям, вызывающим ложные срабатывания электротермических актуаторов. Для решения этой проблемы были разработаны электротермические МЭМС ПИМ с системами механического декодирования сигналов, поступающих с платы управления взрывателем.

В МЭМС ПИМ с электротермическим приводом, разработанном К. Fang et al. в 2019 году, для обеспечения надежности срабатывания был создан МЭМС ПИМ, состоящий из набора электротермических приводов для вращения кодового колеса с отверстиями для прохода пламени воспламенителя. Кодовое колесо является подвижной шторкой ПИМ [14]. Внешний вид МЭМС ПИМ с механическим декодированием представлен на рисунке 22.

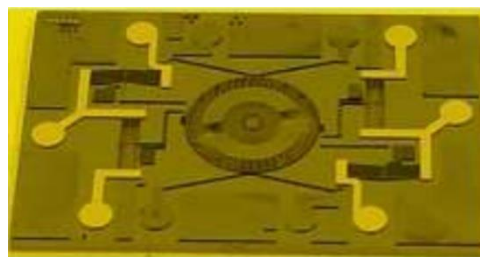


Рисунок 22– Внешний вид МЭМС ПИМ с механическим декодированием [14]

На кодовом колесе расположен набор зубьев и набор “зубьев-защелок”, обратимо заклинивающих кодовое колесо при ошибках передачи данных. Принцип работы механического декодирования показан на рисунках 23-24.

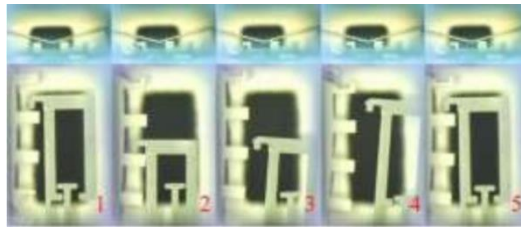


Рисунок 23 – Декодирование зуба шестерни [14]

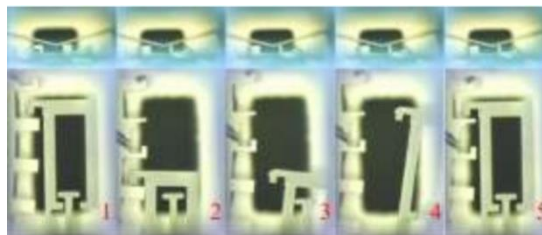


Рисунок 24 – Декодирование “зуба-защелки” шестерни [14]

Механизм был изготовлен из “кремния на изоляторе” при помощи всего лишь трех фотошаблонов, имеет размер $13,413 \times 0,454$ мм и может быть оснащен интегрированным воспламенителем и детонатором.

В другом МЭМС ПИМ, разработанном этими же авторами [15], используется шторка с зубчатыми рейками с зубьями разной ширины, приводимая в движение при помощи электротермических актуаторов. Устройство такого МЭМС ПИМ показано на рисунке 25.



Рисунок 25 – Устройство МЭМС ПИМ с механическим декодированием [15]

При ошибках декодирования происходит обратимое заклинивание зубчатой рейки шторки зубьями актуаторов. Взаимное положение зубьев и зубчатой рейки при ошибке декодирования показано на рисунке 26.



Рисунок 26 – Взаимное положение зубьев и зубчатой рейки шторки при ошибке декодирования [15]

Для изготовления механизма использовался “кремний на изоляторе”, размер механизма составляет 14,2x10,5x0,453 мм. Механизм может быть оснащен интегрированным детонатором из азида меди с навеской 0,5 мг.

1.5 МЭМС ПИМ на смешанных физических принципах

Т. Young разработал МЭМС ПИМ на смешанных физических принципах в 2016 году [16]. Устройство механизма представлено на рисунке 27.

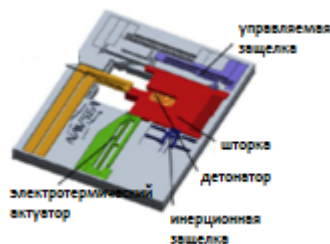


Рисунок 27 – Устройство МЭМС ПИМ на смешанных физических принципах [16]

Механизм использует для своей работы инерцию (I ступень предохранения) и электротермический актуатор (II ступень предохранения) для разблокировки подвижной шторки, электротермические актуаторы для перемещения шторки. При выстреле, за счет сил инерции, происходит предварительная разблокировка подвижной шторки, которая, затем, по команде системы управления взрывателем, окончательно разблокируется при помощи электротермического актуатора. По команде системы управления взрывателем, шторка перемещается при помощи электротермического привода в боевое положение. Устройство создано из структуры “кремний на изоляторе”. Внешний вид взрывателя показан на рисунке 28.

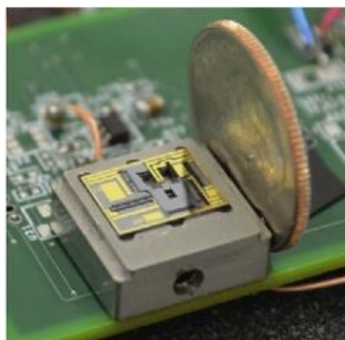


Рисунок 28 – Внешний вид взрывателя с МЭМС ПИМ [16]

D. Wang et al. разработали МЭМС ПИМ на смешанных принципах (воздействие центробежных сил и пиротехнического актуатора) для снарядов малокалиберной артиллерии в 2017 году [17]. Механизм состоит из шторки, пружин шторки, пружинной защелки, открывающейся под действием центробежной силы (I ступень предохранения) и пиротехнического актуатора (II ступень предохранения). Устройство механизма показано на рисунке 29.



Рисунок 29 – Устройство МЭМС ПИМ на смешанных физических принципах [17]

При выстреле за счет центробежных сил снимается пружинная защелка со шторки, однако она продолжает удерживаться за счет второго замка. На определенной дистанции по команде системы управления взрывателем срабатывает пиротехнический актуатор и отгибает вторую защелку, освобождая шторку, которая, под действием пружин перемещается из безопасного в боевое положение. Механизм имеет размеры 14x14x1,5мм и изготовлен из меди при помощи LIGA-технологии. Внешний вид механизма представлен на рисунке 30.

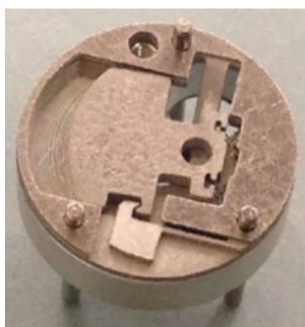


Рисунок 30 - Внешний вид МЭМС ПИМ на смешанных физических принципах [17]

Использование нескольких физических принципов для работы механизма значительно повышает безопасность обращения с боеприпасами за счет уменьшения вероятности ложного срабатывания.

1.6 МЭМС ПИМ с пьезоэлектрическим приводом

D. Sun et al. в 2019 году представили прототип подвижной шторки с отверстием, оснащенной Н-образным линейным пьезоэлектрическим двигателем [18]. Механизм состоит из металлической Н-образной рамы с наклеенными на нее керамическими пьезоэлектрическими элементами. При подаче переменного напряжения на различные группы пьезоэлектрических элементов Н-образная рама удлиняется и изгибается, что приводит к ее перемещению в корпусе ПИМ. Керамические вкладки, расположенные по бокам от движителя и закрепленные в раме, играют роль фрикционного элемента и препятствуют перемещению шторки при механических воздействиях. При достижении определенного количества циклов перемещений шторка с отверстием открывает доступ пламени от воспламенителя к детонатору. Размеры шторки с пьезоэлектрическим приводом составляли 20x20 мм. Устройство механизма показано на рисунке 31.

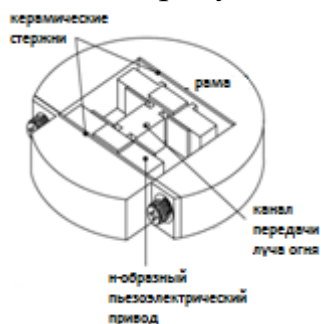


Рисунок 31 – Устройство пьезоэлектрического МЭМС ПИМ [18]

2 Достоинства и недостатки различных типов МЭМС ПИМ

2.1 МЭМС ПИМ с инерционным приводом

Инерционные МЭМС ПИМ надежны, так как требуют для своего срабатывания сильных воздействий, что повышает безопасность обращения с боеприпасами. Как правило, подобные типы механизмов изготавливаются из высокопрочных материалов, таких как никель, кобальт, их сплавы, или из нержавеющей стали. Высокопрочные материалы надежно блокируют передачу ударной волны или луча огня при несанкционированном срабатывании ПИМ. Однако подобные механизмы имеют ограниченное применение. Методы производства подобных устройств не требуют применения высокоточных технологий микроэлектроники и ограничиваются EFAB, LIGA процессами, жидкостным химическим травлением либо электроэрозионной обработками. Обратной стороной является то, что данные устройства имеют большие габариты по сравнению с другими типами МЭМС ПИМ. Кроме того, подобные механизмы являются чисто пассивными и не поддерживают активное управление их срабатыванием.

2.2 МЭМС ПИМ с электромагнитным приводом

Подобные устройства так же изготавливаются из высокопрочных материалов, что препятствует распространению луча огня или ударной волны в случае несанкционированного срабатывания. Механизм имеет активное управление и может работать от системы управления взрывателем. Однако необходимость наличия электромагнитных катушек значительно увеличивает габариты механизма. Подобные механизмы так же изготавливаются при помощи LIGA процесса и не требуют для своего производства технологий микроэлектроники.

2.3 МЭМС ПИМ с пиротехническим приводом

Механизмы нечувствительны к внешним воздействиям и могут быть использованы для различных систем вооружения. Механизм имеет минимум деталей, он малогабаритен. Так как для привода используется пиротехнический заряд, подвижная шторка может быть перемещена на значительное расстояние, что обеспечивает большую безопасность. Однако данные устройства не могут быть полностью изготовлены на МЭМС производствах, так как требуют отдельной зарядки пиротехнического привода энергетическим веществом, а связанные со срабатыванием пиротехнического привода явления (высокая температура, искры ит.д.) могут привести к преждевременному срабатыванию детонатора.

2.4 МЭМС ПИМ с электротермическим приводом

МЭМС ПИМ с электротермическим приводом так же имеет активное управление при помощи системы управления взрывателем. Процесс термического расширения материалов хорошо изучен и способен обеспечить надежную работу механизма. Как правило, подобные механизмы изготавливаются из монокристаллического кремния, доступного материала со стабильными параметрами. Для изготовления деталей из кремния необходимо применение технологий микроэлектроники, что препятствует быстрому прототипированию устройств, а конечная стоимость изготавливаемых прототипов велика. Низкая ударная прочность и сгораемость кремниевой шторки не позволяет использовать ее для блокировки распространения ударной волны или луча огня, однако данный недостаток может быть нивелирован при помощи напыления на шторку металлического слоя.

Время срабатывания электротермических МЭМС ПИМ велико, а расстояние перемещения шторки при помощи электротермических актуаторов мало из-за низкого термического расширения кремния. Данный недостаток может быть решен при помощи системы рычагов. Механизмы устойчивы к ложным срабатываниям за счет системы механического декодирования, что делает их еще более защищенными от преждевременного срабатывания по сравнению с остальными типами МЭМС ПИМ. Использование технологий микроэлектроники на кремниевой подложке позволяет создавать как миниатюрные ПИМ, так и взрыватели с интегрированными воспламенителями и детонаторами.

2.5 МЭМС ПИМ на смешанных физических принципах

Подобные МЭМС ПИМ имеют активное управление. За счет использования различных принципов для взведения обладают большей безопасностью при обращении с боеприпасами, так как вероятность ложного срабатывания снижена по сравнению с МЭМС ПИМ, использующими для взведения только один физический принцип. Однако подобные устройства, как правило, имеют большие габариты.

2.6 МЭМС ПИМ с пьезоэлектрическим приводом

Данные МЭМС ПИМ так же имеют активное управление. Имеют большую скорость взведения, что может быть использовано для высокоскоростных боеприпасов. Однако требуют для своей работы больших токов и напряжений и имеют большие габариты.

3 Перспективы применения МЭМС ПИМ

В настоящее время исследования по разработке новых систем вооружения направлены, как на увеличение их могущества, повышение точности и надежности их применения, так и на улучшение массогабаритных характеристик. Этого можно достичь, в том числе, уменьшением размеров и массы отдельных функциональных узлов и элементов конструкции боеприпаса, в частности, взрывателя. Наибольший объем в конструкции взрывателя занимает ПИМ. Применение МЭМС технологий позволит значительно уменьшить его размеры и массу, по сравнению с ПИМ, разработанных на основе классических машиностроительных технологий. Кроме того, к взрывательным устройствам для современных боеприпасов предъявляются требования по наличию в их конструкции систем активного управления ПИМ, что так же может быть достигнуто за счет применения МЭМС технологий.

В связи с вышеизложенным, актуальным вопросом является совершенствование взрывательных устройств за счет применения МЭМС технологий.

Библиография

1. Robinson C. H., Wood R. H., Hoang T. Q. Miniature MEMS-based electro-mechanical safety and arming device : пат. 6964231 США. – 2005.
2. Renz J. MEMS based fuze technology //Proc. NDIA. – 2015.
3. Jeong J. et al. Miniature mechanical safety and arming device with runaway escapement arming delay mechanism for artillery fuze //Sensors and Actuators A: Physical. – 2018. – Т. 279. – С. 518-524.
4. Qin Y. et al. Test and Improvement of a Fuze MEMS Setback Arming Device Based on the EDM Process //Micromachines. – 2022. – Т. 13. – №. 2. – С. 292.
5. Maurer W. H., Soto G. H., Hollingsworth D. R. Method for utilizing a MEMS safe arm device for microdetonation : пат. 7007606 США. – 2006.
6. Wu Z. Design and research on the key technologies for small electromechanical fuze //Nanjing University of Science & Technology, Nanjing. – 2010.
7. Pezous H. et al. Integration of a MEMS based safe arm and fire device //Sensors and Actuators A: physical. – 2010. – Т. 159. – №. 2. – С. 157-167.

8. Zhu P. et al. Design, preparation, and performance of a planar ignitor inserted with PyroMEMS safe and arm device //Journal of Microelectromechanical Systems. – 2018. – T. 27. – №. 6. – C. 1186-1192.
9. Lake R. A., Starman L. V. A., Coutu R. A. Electrothermal actuators for integrated MEMS safe and arming devices //MEMS and Nanotechnology, Volume 2. – Springer, New York, NY, 2011. – C. 215-222.
10. Zhou X. et al. Analysis and design of a high power laser interrupter for MEMS based safety and arming systems //Microsystem Technologies. – 2017. – T. 23. – №. 8. – C. 3175-3184.
11. Hu T. et al. Integration design of a MEMS based fuze //Sensors and Actuators A: Physical. – 2017. – T. 268. – C. 193-200.
12. Wang K. et al. Research on a MEMS pyrotechnic with a double-layer barrier safety and arming device //Defence Technology. – 2021.
13. Hu T. et al. The development of an on-chip microinitiator with a built-in safety-and-arming device //Review of Scientific Instruments. – 2021. – T. 92. – №. 2. – C. 025007.
14. Fang K. et al. Research on a MEMS based encrypted rotary safety and arming device //Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – T. 301. – C. 111781.
15. Fang K. et al. Research on an on-chip MEMS based safety and arming device with a mechanical encryption system //Micromachines. – 2019. – T. 10. – №. 6. – C. 407.
16. Young T. T. DoD MEMS fuse reliability evaluation //Proceedings of the 59th Annual NDIA Fuze Conference, Charleston, SC, USA. – 2016. – T. 5.
17. Wang D. et al. Design of high-reliability micro safety and arming devices for a small caliber projectile //Micromachines. – 2017. – T. 8. – №. 8. – C. 234.
18. Sun D. et al. Design of an H-shaped linear piezoelectric motor for safety and arming device //Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – T. 303. – C. 111687.