

МЭМС ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ

©2017 В.П. Бондаренко, А.Л. Долгий, Е.Б. Чубенко, С.В. Редько

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Беларусь

В докладе рассматриваются вопросы применения технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) для изготовления реактивных микродвигателей для наноспутников. Представлены результаты разработок двух типов микродвигателей: матричного на твердом топливе и струйного электростатического с топливом на основе ионной жидкости.

Ключевые слова: Микроразмерная обработка, реактивные микродвигатели, наноспутники.

Для изготовления элементов реактивных микродвигателей, имеющих малые размеры и сложную форму, целесообразно применять технологию микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1]. МЭМС технология зародилась в недрах кремниевой микроэлектроники и использует технологические приемы этой технологии для микроразмерной обработки материалов с очень высокой точностью, которую не способны обеспечить традиционные методы механической обработки. Кремний в виде пластин, а также металлические и диэлектрические материалы в виде пленок являются основными конструкционными материалами, из которых изготавливаются МЭМС устройства. Возможно использование и других материалов (например, стали, керамики и др.), но при этом они должны иметь форму тонких пластин с диаметром, соответствующим диаметру кремниевых пластин. Это связано с тем, что микроразмерная обработка этих пластин проводится на технологических линиях микроэлектронного производства. Применение МЭМС технологии для изготовления реактивных микродвигателей требует изучения возможности использования кремния как конструкционного материала и решения задач микроразмерной обработки других (не кремниевых) материалов. Микроразмерная обработка в МЭМС технологии основана на использовании фотолитографии и различных приемов травления, которые представлены методами жидкостного химического и электрохимического травления, сухими плазмохимическими методами и методами ионного распыления [2]. Достоинствами этого подхода являются высокая точность изготовления элементов микродвигателей; возможность изготовления механических, электрических и других элементов со сложной топологией и комплексной структурой; групповое изготовление одинаковых элементов с последующей их объемной сборкой.

Кремний как механический материал привлекает внимание специалистов микросистемной техники с начала 70-х годов прошлого столетия [3]. Механические свойства кремния очень хорошо изучены в области высоких температур. Это объясняется необходимостью проведения высокотемпературных обработок кремниевых пластин в процессе изготовления интегральных микросхем. Кремний обладает высокой твердостью, хорошей теплопроводностью, коэффициент теплового линейного расширения составляет $5,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что в три раза меньше, чем у стали. Основной проблемой использования кремния как конструкционного материала является высокая хрупкость. Из-за хрупкости в пластинах кремния практически невозможно изготовление пространственных форм методами прямой механической и лазерной обработки, поскольку при таких обработках в кремнии образуются дислокации и трещины.

Разработка реактивных микродвигателей для наноспутников является сложной задачей, требующей междисциплинарного взаимодействия таких научных направлений как теория реактивных двигателей, материаловедение, микроэлектронная и нанотехнологии. В настоящем докладе представлены результаты разработок двух типов микродвигателей:

матричного на твердом топливе и электростатического струйного с топливом на основе ионной жидкости.

Матричный микродвигатель на твердом топливе состоит из нескольких блоков, которые изготавливаются из кремниевых пластин с помощью МЭМС технологии. Микродвигатель представляет собой матрицу из 25 (5x5) реактивных двигателей, каждый из которых состоит из трех частей: камеры сгорания с твердым топливом, сопла и устройства термоэлектрического поджига. Конструкция двигателя обеспечивает независимое включение любого двигателя в матрице для получения единичного импульса тяги. В качестве топлива используется глицидилазидополимер (ГАП). Термодинамические расчеты показали, что ГАП обеспечивает достаточно высокие удельные импульсы тяги и низкие температуры сгорания, не превышающие предела термостойкости кремния, из которого изготовлен корпус двигателя. Численно решена самосогласованная задача, связывающая основные параметры горения топлива с конструктивными характеристиками двигателя. Сформулированы рекомендации выбора геометрии газодинамического тракта, позволяющие обеспечить требуемые значения суммарного импульса тяги микродвигателя. Проведены экспериментальные тестовые испытания, подтверждающие работоспособность предложенной конструкции микродвигателя [4].

Для малых космических аппаратов формата CubeSat активно разрабатываются реактивные струйные микродвигатели, в которых нет взрывоопасного топлива [5]. В докладе будет представлен анализ состояния исследований по возможности применения МЭМС технологии для изготовления термоструйных и электростатических струйных двигателей, а также двигателей с пьезоэлектрическим стриктором. Основное внимание будет уделено электростатическим струйным двигателям, в основе работы которых лежит принцип ускорения заряженных частиц рабочего тела в электрическом поле. Образование заряженных частиц в таких двигателях происходит в результате распыления с поверхности проводящей жидкости, помещенной в сильное электрическое поле. В этом поле под воздействием сил поверхностного натяжения жидкость деформируется в стационарный конус, который называется конусом Тэйлора. Вследствие большой величины напряженности электрического поля стационарность конуса Тэйлора на острие нарушается и происходит эмиссия ионов и микрокапель рабочего тела. Большие величины электрического поля, которые необходимы для поддержания этого процесса, обуславливают необходимость использования эмиттеров специальной формы наподобие иглы или микрокапилляра. Реализовать такие эмиттеры мы рассчитываем с использованием приемов МЭМС технологии. Корпус струйного электростатического двигателя выполняется из стали с использованием традиционных методов механической обработки, а наиболее ответственный узел – протяженная щель для формирования микрокапилляра – изготавливается по МЭМС технологии. Электростатический струйный микродвигатель будет иметь массу не более 650 г и размеры 10x10x10 см. Двигатель будет иметь следующие тяговые характеристики: развиваемая тяга – не менее $2 \cdot 10^{-4}$ Н; удельный импульс – не менее 3000 с; удельный суммарный импульс – не менее 1000 Н·с.

Библиографический список

1. Александров С.Е., Коротынский А.В., Тимофеев С.С., и др. Перспективы развития микрореактивных двигателей для МСТ; - Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам. Сборник статей под ред. Мальцева П.П. Москва. Техносфера. 2005. – 554-561 с.
2. Madou J. M. Fundamentals of microfabrication and nanotechnology; - CRC Press, 2011. – 670 p.
3. Peterson, K. Silicon as a mechanical material; - Proceedings IEEE, 1982. 70(5) – 420-457 p.
4. Бондаренко В.П., Долгий Л.Н., Футыко С.И., Миклашевич И.А. Миниатюрный двигатель МЭМС на твердом топливе для наноспутников; - Минск: Материалы 5-го белорусского космического конгресса, 2011. – <http://cosmos.basnet.by/belcosm5/index.html>.

5. Ma C., Ryan C. Numerical study of a new microporous silicon electrospray thruster; - London, Imperial College, Book of abstracts. 8th European CubeSat Symposium, 2016. – Abstract 41.

References

1. Aleksandrov S.E., Korotinskyi A.V., Timofeev S.S., et al. Perspectives of developing micropropulsion thrusters for MST; - Nano- and microsystems technique. From investigations to developments. Book of articles edited by Maltsev P.P. Moscow. Technosphere. 2005. – 554-561 p.

2. Madou J. M. Fundamentals of microfabrication and nanotechnology; - CRC Press, 2011. – 670 p.

3. Peterson, K. Silicon as a mechanical material; - Proceedings IEEE, 1982. 70(5) – 420-457 p.

4. Bondarenko V.P., Dolgyi L.N., Futko S.I., Miklashevich I.A. MEMS minithruster with solid propellant for nanosatellites; - Minsk: Proceedings of the 5-th Belarusian space congress, 2011. – <http://cosmos.basnet.by/belcosm5/index.html>.

5. Ma C., Ryan C. Numerical study of a new microporous silicon electrospray thruster; - London, Imperial College, Book of abstracts. 8th European CubeSat Symposium, 2016. – Abstract 41.

MEMS TECHNOLOGY FOR FABRICATING MICROTHRUSTERS OF NANOSATELLITES

© 2017 V.P. Bondarenko, A.L. Dolgyi, E.B. Chubenko, S.V. Redko

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

In the present work the application of microelectromechanical systems (MEMS) technology to fabricate the propulsion microthrusters for nanosatellites is discussed. Two types of microthrusters are described: matrix thruster based on solid propellant and electrostatic thruster based on ionic liquids.

Key words: Microsized etching, propulsion microthrusters, nanosatellites

Информация об авторах

Бондаренко Виталий Парфирович, к.т.н., доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией “Материалы и структуры наноэлектроники”, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки 6, тел.: +375-17-293-88-43, vitaly51@mail.ru.

Область научных интересов: микроэлектроника, нанотехнологии и наноматериалы.

Долгий Алексей Леонидович, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории “Материалы и структуры наноэлектроники”, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки 6, тел.: +375-17-293-88-43, dolgyi@bsuir.by.

Область научных интересов: микроэлектроника, нанотехнологии и наноматериалы.

Чубенко Евгений Борисович, к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории “Материалы и структуры наноэлектроники”, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки 6, тел.: +375-17-293-88-43, eugene.chubenko@bsuir.by.

Область научных интересов: нанотехнологии и наноматериалы, электрохимические и химические процессы в микроэлектронике.

Редько Сергей Владимирович, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории “Материалы и структуры наноэлектроники”, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки 6, тел.: +375-17-293-88-43, sv.redko@bsuir.by.

Область научных интересов: микроэлектроника, нанотехнологии и наноматериалы, компьютерное моделирование.

About the authors

Bondarenko, Vitaly Parfirovich, Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of Scientific Research Laboratory “Materials and Structures of Nanoelectronics”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki str. 6, tel.: +375-17-293-88-43, vitaly51@mail.ru.

Area of research: microelectronics, nanotechnologies and nanomaterials

Dolgiy Alexey Leonidovich, Senior Scientific Researcher of Scientific Research Laboratory “Materials and Structures of Nanoelectronics”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki str. 6, tel.: +375-17-293-88-54, dolgiy@bsuir.by.

Area of research: microelectronics, nanotechnologies and nanomaterials

Chubenko Eugene Borisovich, Candidate of Engineering, Leading Scientific Researcher of Scientific Research Laboratory “Materials and Structures of Nanoelectronics”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki str. 6, tel.: +375-17-293-88-54, eugene.chubenko@bsuir.by.

Area of research: nanotechnologies and nanomaterials, electrochemical and chemical processes in microelectronics.

Redko Sergey Vladimirovich, Scientific Researcher of Scientific Research Laboratory “Materials and Structures of Nanoelectronics”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki str. 6, tel.: +375-17-293-88-54, sv.redko@bsuir.by.

Area of research: microelectronics, nanotechnologies and nanomaterials, computer simulation