

УДК 621.315.592.2:546.28

УВЕЛИЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА В МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭНЕРГИЮ ГОРЕНИЯ НАНОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

А.В. ДОЛБИК, А.Ю. ЗУБОВ, С.Н. КРИСЕВИЧ, А.С. СЫЧЕВИЧ,
А.В. КОРОТКЕВИЧ, С.К. ЛАЗАРУК, В.А. ЛАБУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 30 июня 2015

Процесс горения нанопористого кремния с межпоровым пространством, заполненным твердотельным окислителем, исследовался с целью его использования в качестве источника энергии для механического движения микроэлектромеханических систем с реактивной тягой. Исследования показали, что механический импульс микросистемы с кремниевым чипом площадью 1 см^2 может быть увеличен до 130 мН с за счет увеличения объема нанопористого кремния, а также за счет увеличения массы несущей платформы.

Ключевые слова: нанопористый кремний, окислитель, механический импульс.

Введение

Миниатюрные двигатели с реактивной тягой используются в микроэлектромеханических системах (МЭМС) последние 15 лет для передвижения микро-, нано- и пико- спутников. Эти небольшие спутники требуют эффективных двигательных установок для их маневрирования на космической орбите. Разработка таких МЭМС проводится по двум направлениям: миниатюризация обычных двигателей и поиск новых твердотельных энергетических материалов и концепций их использования в микродвигателях [1]. Одним из решений вышеупомянутой проблемы является использование нанопористого кремния в качестве энергетического материала.

Нанопористый кремний, как правило, формируется путем анодирования кремниевой пластины в процессе электрохимического травления [2] и становится энергетическим материалом, если его нанопоры заполняются окислителем [3]. Нанопористый кремний, контактирующий с находящимся в его порах твердотельным окислителем, способен гореть и даже взрываться [4].

В статье представлены результаты измерений механического импульса при горении нанопористого кремния внутри кремниевых чипов, закрепленных на металлических платформах различной массы.

Методика эксперимента

Кремниевые пластины p -типа, легированные бором с проводимостью $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, использовались для изготовления пористого кремния путем электрохимического анодирования в электролите на основе водного раствора плавиковой кислоты и этанола (2 части 48 % HF и 1 часть этанола) при плотности тока $50 \text{ мА}/\text{см}^2$. Область анодирования определялась O -образной маской с внутренним диаметром 10 мм . Время анодирования варьировалось для получения пористых слоев толщиной 40 и 70 мкм . После этого образцы промывали в этаноле, высушивали и пропитывали насыщенным спиртовым раствором NaClO_4 .

Пропитка пористого кремния производилась нанесением раствора окислителя из пипетки непосредственно на поверхность пористого кремния. Данная процедура производилась два раза. После этого образцы сушили при температуре $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Толщина пористых слоев измерялась с использованием метода оптической и электронной микроскопии.

Для определения величины механического импульса, создаваемого при горении пористого кремния, использовали систему, состоящую из кремниевого чипа и несущей платформы (круглой металлической пластины), соединенных с помощью клея.

Инициирование процессов горения и взрыва слоев пористого кремния осуществлялось путем помещения образцов на плитку, нагретую до 500 °С. После инициирования процессов горения и взрыва реактивная сила поднимала исследуемую систему вверх. Видеокамера со скоростью записи 30 кадров в секунду записывала движение несущей платформы.

Импульс оценивался по формуле: $P = m \frac{\Delta l}{\Delta t}$, где P – импульс, m – масса исследуемой системы, Δl – расстояние, которое платформа проходила за промежуток времени Δt равный одному кадру съемки.

Результаты и обсуждение

В изготовленных образцах горизонтальные размеры пористого слоя в несколько раз больше, чем его толщина. Из-за этого реактивная сила, возникающая в процессе горения нанопористого кремния, толкает образец в направлении, перпендикулярном его плоскости поверхности.



Рис. 1. Фотографии эксперимента: *a* – инициирование и первый кадр полета; *б* – второй кадр полета

На рис. 1 показаны фотографии испытаний в моменты инициирования и последующего вертикального перемещения несущей платформы. За время первого кадра образец переместился на 37 см, за время второго – на 35 см. Траекторию движения можно увидеть благодаря процессу дефлаграции в пористом кремнии после взрыва. Учитывая массу испытываемых образцов, авторами был рассчитан механический импульс системы с реактивной тягой для различных толщин пористого кремния (рис. 2). Исследуемые образцы смогли продемонстрировать механический импульс до 130 мН·с.

Ранее было обнаружено, что пористый кремний толщиной более 30 мкм, пропитанный раствором твердотельного окислителя, демонстрирует процесс взрыва с появлением ударной волны [5]. Закрепление кремниевого чипа с пористым кремнием на несущей платформе, масса которой превышает массу чипа, приводит к изменению условий распространения ударной волны. Интенсивность звука ударной волны уменьшается с увеличением массы системы, потому что ударная волна заметно ослабевает для систем с большей массой, следовательно, выделяемая энергия в большей мере преобразовывается в механическую энергию движения, чем в энергию ударной волны, что подтверждают результаты испытаний (рис. 2).

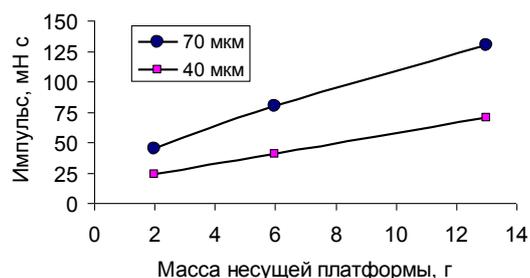


Рис. 2. Зависимость импульса от массы несущей платформы с пористым кремнием толщиной 40 и 70 мкм

Как известно, пористый кремний *p*-типа включает наночастицы размером от 1 до 15 нм [2, 6]. Если интенсивность ударной волны уменьшается, то меньшая часть наночастиц будет подвержена взрыву (рис. 1, *a*), а остальные наночастицы большего размера будут подвергаться процессу дефлаграции (быстрого сгорания) продолжительностью несколько миллисекунд (рис. 1, *a, б*).

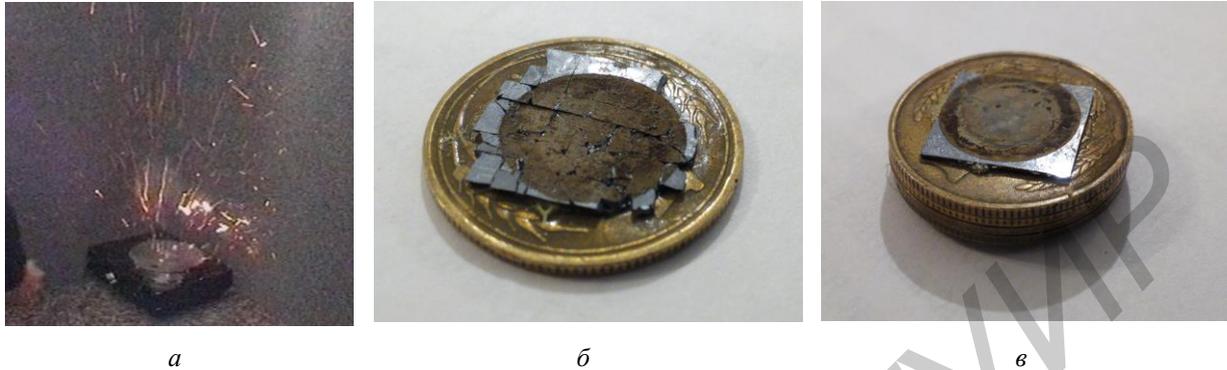


Рис. 3. Фотографии тестируемых образцов: чип пористого кремния без несущей платформы во время процесса взрыва (*a*); чип пористого кремния закрепленные на несущей платформе с массой 3 г (*б*); и с массой более 10 г после испытаний (*в*)

Процесс дефлаграции способствует росту реактивной силы во время взлета, приводя к получению рекордного механического импульса величиной в 130 мН·с для образца с пористым кремнием толщиной 70 мкм. Испытываемые образцы с толщиной пористого кремния более чем 40 мкм без несущей платформы полностью разрушались после инициирования [7] (рис. 3, *a*). Испытываемые образцы, закрепленные на несущей платформе, с массой менее 6 г были разрушены частично (рис. 3, *б*), а образцы с массой более 10 г сохраняли целостность после испытаний (рис. 3, *в*).

На рис. 4 представлена фотография поверхности кремниевого кристалла после выгорания пористого кремния. Как видно из рисунка на кремниевой поверхности появляются очевидные артефакты в виде кремниевых образований правильной формы (прямоугольное плато). Такие образования могут появляться в результате оплавления кремния и твердофазной эпитаксии на кремниевой поверхности, что свидетельствует о высоких температурах, сопровождающих процесс горения. Проводимые авторами ранее исследования спектров свечения реакции окисления пористого кремния показали, что температура в области горения и взрыва наноструктурированного кремния достигает более 2000 °С [8].



Рис. 4. Фотография поверхности кремниевого кристалла после выгорания пористого кремния

Исследуемые микросистемы могут быть использованы в качестве матричных микродвигателей, закрепленных на корпусе космических спутников малых размеров. Коррекция их орбиты может осуществляться иницированием процесса горения в отдельных чипах посредством подачи электрического импульса к пористому кремнию, пропитанному твердотельным окислителем. Импульса величиной 100 мН·с достаточно для перемещения объекта массой около 1 кг в условиях невесомости. Учитывая, что таких кремниевых чипов можно разместить по несколько штук на каждой стороне спутника, то такая система будет достаточно управляема при минимальной массе энергетического материала, что и требуется для космических объектов малых размеров. На рис. 5 показано возможное размещение

разработанных кремниевых чипов с нанопористым кремнием на борту спутника малых геометрических размеров.

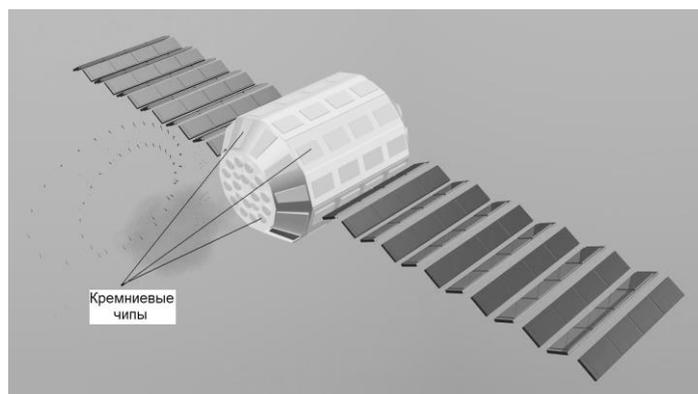


Рис. 5. Спутник малых размеров с матричными микродвигателями на основе кремниевых чипов с нанопористым кремнием

Заключение

Проведенные исследования показали, что механический импульс, возникающий при горении пористого кремния, увеличивается при увеличении толщины пористого кремния и массы несущей платформы. Полученные значения импульса 25–130 мН·с свидетельствуют о перспективности использования нанопористого кремния в качестве источника энергии в МЭМС.

MECHANICAL IMPULSE ENHANCEMENT IN MEMS USING POROUS SILICON COMBUSTION PROCESS

A.V. DOLBIK, A.YU. ZUBOV, S.N. KRISEVICH, A.S. SYCHEVICH, A.V. KOROTKEVICH,
S.K. LAZAROUK, V.A. LABUNOV

Abstract

Nanostructured porous silicon impregnated by solid state oxidants has been studied in order to provide the mechanical impulse for jet-propulsion microsystems. The system with jet-propulsion movement on a silicon chip has been used for impulse measurements. The estimated impulse value is in the range of 25-130 mN·s by using of carrying platform for Si chips.

Список литературы

1. Zakar E. Technology Challenges in Solid Energetic Materials for Micro Propulsion Applications, USA, 2009.
2. Canham L.T. Properties of Porous Silicon. London, 1997.
3. Clement D., Diener J., Gross E. et al. // Phys. Status Solidi A. 2005. Vol. 202. P. 1357–1364.
4. Moniko du Plessis // Propellants Explos. Pyrotech. 2014. Vol. 39. P. 348–364.
5. Лазарук С.К., Долбик А.В., Жагиро П.В. и др. // ФТП. 2005. Т. 39. С. 917–919.
6. Viet Cuong Nguyen, Pita K., Kam C.H. et al. // J. Propuls. Power. 2015. Vol. 31, № 2. P. 694–698.
7. Лазарук С.К., Долбик А.В., Лабунов В.А. и др. // ФТП. 2007. Т. 41. С. 1130–1134.
8. Долбик А.В., Лазарук С.К., Луценко Е.В. и др. // Известия Белорусской инженерной академии. 2005. № 1 (19) /5. С. 30–32.