

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.384.637

Сычевич  
Александр Сергеевич

Микроактюаторы, использующие энергию горения нанопористого кремния

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на  
квантовых эффектах»

Научный руководитель

Лазарук Сергей Константинович  
д. ф.-м.

Минск 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Интерес к структурам пористого кремния (ПК) резко возрос после открытия Кенхемом эффективной фотолюминесценции в видимой области спектра оптического излучения. Нано размерность открывает широкие возможности для применения его в качестве нового материала для оптоэлектроники, наноэлектроники и других отраслей науки и техники. Поверхность слоев ПК текстурирована – она имеет различные морфологические особенности – от кораллообразной структуры до четко определенной колоннообразной структуры, что открывает широкие возможности для их применения в качестве чувствительных слоев в газовых и биосенсорах, а также в кремниевых солнечных элементах. Развитая внутренняя поверхность этого материала и наличие в нем наноразмерных структур определяют его свойства, одним из которых является каталитическое поддержание окислительных реакций, приводящих к горению и даже взрыву находящихся в порах реагентов.

Пористый кремний в основном получается электрохимическим анодированием. На процесс его получения влияют такие факторы, как потенциал, приложенный в процессе анодирования, конструкция электрохимической ячейки и т.д. Такие основные свойства пористого кремния, как пористость, толщина, диаметр пор и микроструктура зависят от режима анодирования, раствора, протекающего тока, а также от удельного сопротивления исходных кремниевых пластин. При изменении этих факторов, влияющих на основные свойства получаемых слоев ПК, микроструктура и пористость получаются разными.

Целью данной работы является исследование энергетических свойств пористого кремния, возникающих в процессе экзотермической реакции окисления пористого кремния, и измерения механического импульса системы на основе пористого кремния.

Задачей данной работы является определение толщин пористого кремния, а также нахождение необходимых методов для получения максимальных значений механического импульса, получаемых в результате горения пористого кремния.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Актуальность работы определяется необходимостью исследования пористого кремния и разработки методов по изучению энергетических свойств пористой структуры.

**Цель и задачи исследования.** Изучение процессов получения нанопорметодом анодирования.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ современного состояния исследований получения пористого кремния.
2. Постановка и изучение методики получения пористого кремния методом анодирования.
3. Постановка и изучение методик получения пористого кремния путем анодирования кремниевых пластин.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является пористый кремний. Предметом исследования являются параметры технологических процессов для формирования пор.

**Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики.** Работа выполнялась в рамках ГБЦ №18-3137 «Разработка методов увеличения механического импульса, генерируемого при горении наноструктурированного кремния».

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Отработка режимов для формирования пористого кремния методом анодирования.
2. Методика получения пор в плавиковой кислоте.
3. Методика исследования энергетических свойств пористого кремния.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Аналитическое исследование современных методов получения микро- и наночастиц проводилось соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем были исследованы зависимости пористого слоя от времени анодирования. Проводилась разработка технологии получения пористого кремния и дальнейшего исследования энергетических свойств пористого слоя.

**Апробация результатов диссертации.** Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы, а также результаты прикладных исследований и разработок приведены в публикациях.

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 3 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 37 наименований. Общий объем диссертации составляет 58 страниц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В настоящее время наблюдается большой интерес к изучению характеристик пористого кремния, так как его применение открывает возможность вернуться к традиционной, более дешевой кремниевой технологии даже в тех случаях, когда обычно использовались иные вещества и материалы. В связи с этим большое число работ направлено как на изучение физико-химических свойств этого нового материала, так и на исследования закономерностей его получения. О процессах, происходящих в ходе порообразования, можно судить как по динамике основных параметров системы, так и по окончательно сформированной морфологии пористой структуры. Проблемы динамического поведения параметров системы: плавиковая кислота (HF)–кремний (Si) в ходе процессов порообразования, как и вопросы, связанные с морфологией образующейся пористой структуры, изучены недостаточно хорошо.

Существует множество способов образования. Однако несмотря на то, что объясняется возможность образования нескольких типов морфологии пор, нельзя считать окончательной, поскольку она не приводит к удовлетворительному согласию с экспериментом для зависимостей поперечных размеров макропор от приложенного потенциала при описании формирования пористого кремния.

Как следует из всего отмеченного выше, в настоящее время существует настоятельная потребность для дальнейшего исследования системы с целью развития новых подходов к созданию общей теории порообразования в кремнии. Чрезвычайно информативным с точки зрения построения общей теории порообразования в кремнии является изучение исследования пористой структуры. На основе исследования можно выделить информацию о физико-химических процессах, происходящих в системе электролит–кремний в ходе анодирования.

Для формирования пористой структуры применяли пластины кремния КЭФ-4.5, КДБ-10 с ориентацией (100) и линейными размерами 20×20 мм. Диаметр анодируемой поверхности составил 1,2 см. Пластины подвергались электрохимическому анодированию в растворе HF:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH=1:3. Изменение длительности анодирования при постоянном значении плотности тока (J=50, 75, 100 мА/см<sup>2</sup>) позволило получать пористые слои с различной толщиной. Толщину пористого слоя L<sub>и</sub> структуру анодируемой поверхности оценивали по фотографиям поверхности и сколам формируемых структур.

Морфологию пористого кремния контролировали путем выбора состава электролита, плотности тока и типа легирующей примеси. Анодирование проводили в 16, 33% растворе плавиковой кислоты (HF).

Было исследовано влияние на энергетические свойства пористого кремния следующих факторов: плотность тока, толщина пористого слоя концентрации электролита, состоящего из смеси HF и этанола в разном соотношении по объему.

Атомы водорода, покрывающие пористый кремний, являются буферным слоем между атомом кремния (Si) и молекулярным кислородом, который предотвращает взаимодействие кислорода с кремнием. При иницировании реакции окисления поверхностные Si-Hсвязи разрываются, создавая оборванные связи Si, а водород удаляется с поверхности. В результате происходит взаимодействие поверхностных атомов Si непосредственно с атомами кислорода из окислителя, приводящее к окислению наноструктур кремния.

Существует несколько типов окислителей для реакции иницирования пористого кремния. Наиболее эффективными являются окислители перхлората натрия из-за способности оставаться в порах. По мере увеличения плотности тока размер пор увеличивается, что является оптимальным для применения в качестве окислителя раствора перхлората натрия (NaClO<sub>4</sub>). Реакция окисления пористого кремния иницируется термическим, электрическим, оптическим способом. В данной работе иницирование производили термическим способом. Процесс горения слоев пористого кремния, для определения величины механического импульса, осуществляли путем помещения образцов, состоящих из кремниевого чипа и несущей платформы, на электрическую плитку, разогретую до 500 °C

При измерении значения импульса образцов одинаковой толщины пористого кремния с разной плотностью значения отличаются незначительно.

Иницирование процессов горения слоев пористого кремния, для определения величины механического импульса, осуществляли путем помещения образцов, состоящих из кремниевых чипов и несущей платформы.

Несущая платформа есть не что иное как груз, который необходимо переместить в пространстве за счет энергии горения наноструктурированного кремния. Общая масса системы составила 20 г.

Измерение импульса оценивали с помощью формулы:

$$P = m \frac{\Delta l}{\Delta t}, \quad (1)$$

Где  $P$  – импульс,  $m$ –масса исследуемой системы,  $\Delta l$  – расстояние, которое платформа проходила за промежуток времени  $\Delta t$  равный одному кадру съемки.

В ходе эксперимента были получены слои пористого кремния с толщинами 15, 35, 80 мкм на подложках КДБ-10; 15, 90, 115 мкм КДБ-10 (16%) и 60, 80, 120 на КЭФ-4,5.

Более толстые слои при плотности  $100 \text{ мА/см}^2$  разрушались. Пористость структур составила 60-70 %. При измерении импульса были получены следующие значения: 10, 60, 100 мН·с, (КДБ-10); 3, 28, 84 мН·с, (КЭФ-4,5). Двойные образцы пластин КДБ-10: 99, 173, 289 мН·с, (КДБ-10).

Установлено, что значения импульса увеличиваются с увеличением толщины пористого слоя, так как более толстые слои пористого кремния выделяют большее количество тепловой энергии в ходе экзотермической реакции окисления, которая преобразуется в механическую энергию движения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследовались структура пористого кремния для выявления его энергетических возможностей. Представлены результаты измерений зависимости толщин пористого кремния от времени анодирования (7,5; 15; 30 минут) и плотности тока. Определен механический импульс при реакции окисления нанопористого кремния внутри кремниевых чипов.

Толщина сформированных слоев пористого кремния составляла 15 - 80 мкм на подложках КДБ-10, 15-115 мкм КДБ-10 (16% HF) и 60 – 120 мкм на КЭФ-4,5.

Для задействия процесса горения, приобретающего при определенных условиях взрывной характер, осуществляется пропитка образца окислителем. Подобное поведение наблюдается и в случае других дисперсных материалов. Однако только в случае пористого кремния удается получить инициирование в пористом слое толщиной несколько десятков микрон с массой взрываемого материала менее миллиграмма. Поэтому можно говорить о реакции окисления на микронном уровне.

Инициирование происходило при термическом нагреве образца. Горение пористого кремния наблюдалось при определенных толщинах пористых слоев от 20 мкм. Это является следствием быстрого окисления наноразмерных кремниевых структур внутри пористого слоя.

При измерении импульса были получены следующие значения: 10, 60, 100 мН·с, (КДБ-10); 3, 28, 84 мН·с, (КЭФ-4,5). Двойные образцы пластин КДБ-10: 99, 173, 289 мН·с, (КДБ-10).

Развитая внутренняя поверхность пористого кремния и наличие в нем наноразмерных структур определяют его энергетические свойства.

Каждый из исследуемых процессов, а именно горение и взрыв пористого кремния могут найти практическое применение при изготовлении микроприборов. Процесс горения пористого кремния может быть использован в качестве источника энергии для кремниевых микроактюаторов, а микровзрыв может быть применен как в самоуничтожающихся кремниевых чипах, так и в технологии изготовления кремниевых интегральных микросхем для разделения кремниевых пластин на отдельные кристаллы.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Лазарук, С.К. Электрическое инициирование реакций быстрого окисления наноструктурированного кремния / С.К. Лазарук, А.В. Долбик, А.С. Сычевич, В.А. Лабунов – Технические средства защиты информации, Минск, БГУИР, 92 С, 2017
2. Долбик, А.В. Увеличение механического импульса в микроэлектромеханических системах, использующих энергию горения нанопористого кремния / А.В. Долбик, А.Ю. Зубов, С.Н. Кричевич, А.В., А.С. Сычевич, А.В. Короткевич, С.К. Лазарук, В.А. Лабунов - Доклады БГУИР вып. 6(92), ст. 90-93, 2015
3. Lazarouk, S. Accumulation of porous silicon combustion energy for mechanical pulse enhancement in MEMS / S. Lazarouk, A. Dolbik, A. Sychevich, E. Maslenkova, Jiang Yuanqing, Deng Zhao, V. Labunov - 17<sup>th</sup> international workshop on new approaches to high-tech, Nano-design, technology, computer simulations (NDTCS-17) October 26-27, 2017