

## ПОЛУЧЕНИЕ СЛОЕВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ПРИБОРОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2016 г. А.О. БЕЛОРУС, Ю.М. СПИВАК, Д.С. СТЕБКО

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)

Пористый кремний применяется в области биомедицины (контейнер для адресной доставки лекарств, фотосенсибилизатор генерации синглетного кислорода для фотодинамической терапии), электроника (функциональные слои в интегральных микросхемах, интегральные резисторы, сенсоры), фотоника (антиотражающие покрытия, люминисцентные приборы, волноводы, интерференционные фильтры) [1-5].

Структура нанопористых материалов в значительной мере зависит от условий их получения [6, 7]. Контроль условий синтеза позволяет изменять свойства материала, такие как пористость, структура поверхности и размеры пор, в широком диапазоне. Перспективность исследований пористого кремния связана с тем, что существует возможность управления геометрией пористой структуры и химическим составом поверхности в процессе получения. Существует отработанная технология получения нанопористого кремния, что позволяет получать материал с заданными характеристиками. Важным вопросом является определение взаимосвязи между условиями получения и свойствами получаемого материала.

Получение пористого кремния проводилось электрохимическим анодным травлением в растворе электролите  $C_3H_8O:HF:H_2O$  на основе плавиковой кислоты. Для исследования изменения площади поверхности в зависимости от плотности тока анодирования, было получено три серии образцов. Образцы представляют собой слой пористого кремния на подложке из монокристаллического кремния типа КЭФ 4,5 (111). Условия получения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики процесса получения образцов

Образец	$J$ , мА/см <sup>2</sup>	Время анодирования, мин
1	30	10
2	50	10
3	80	10

Одним из основных критериев для пористых материалов является размер пор, а также величина удельной площади поверхности [8]. Величина поверхности твердых тел необходима для анализа процессов, происходящих на данной поверхности с участием молекул или атомов (адсорбция, катализ, гидратация, горение и т.д.). При этом важна информация не только о геометрической поверхности твердого тела, но и о доступной поверхности для определенных молекул [9-13]. Для грубодисперсных систем отличие этих величин незначительно, но для микропористых материалов возможно значительное различие между геометрической и доступной для молекул поверхностью. В данной работе для определения величины удельной поверхности был выбран многоточечный метод БЭТ (Брунауер, Эммет, Теллер).

Определение величины удельной поверхности  $S_{уд}$  основано на измерении количества газа-адсорбата, сорбируемого на поверхности исследуемого образца при температуре жидкого азота и различных относительных парциальных давлениях  $P/P_0$  ( $P$  – парциальное давление адсорбата,  $P_0$  – давление насыщенного пара адсорбата при температуре жидкого азота  $T = -196^\circ\text{C}$ ) [14].

Данным методом исследованы образцы, полученные при разных плотностях тока, времени и температуре подготовки 30 мин и  $250^\circ\text{C}$  соответственно. Кроме того, была измерена удельная площадь поверхности для образцов после контакта с индикатором. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные данные удельной площади поверхности по методу БЭТ

Плотность тока анодирования, $\text{mA}/\text{cm}^2$	Величина удельной поверхности $S_{уд}$ , $\text{m}^2/\text{г}$	
	образцы с пористым слоем	образцы с пористым слоем + индикатор
30	$2,4 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,2$
50	$4,2 \pm 0,3$	$2,6 \pm 0,2$
80	$5,3 \pm 0,3$	$2,3 \pm 0,3$

Можно сделать вывод, что увеличение плотности тока анодирования приводит к увеличению удельной площади поверхности. Сравнение величины удельной поверхности образцов с пористым слоем до и после контакта с индикатором, позволяет предположить, что изменение площади связано с адсорбцией индикатора в поры. Для образцов, полученных при небольших плотностях тока, изменение площади незначительно. Это может быть связано с более низкой реакционной способностью материала, полученного при данных условиях. У образцов, полученных при плотностях тока 50 и  $80 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , значительно изменилась площадь удельной поверхности, следовательно, можно предположить более высокую реакционную способность материала. Следует учитывать, что экспериментальные образцы представляют собой слой пористого кремния на подложке из монокристаллического кремния. Удельная площадь поверхности порошков пористого кремния значительно больше. У образцов порошка пористого кремния, полученных при плотности тока анодирования  $80 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , удельная площадь поверхности может достигать  $700 \text{ m}^2/\text{г}$ .

Большая эффективная поверхность и высокая реакционная способность является преимуществом данного материала для применения в функциональных слоях в интегральных микросхемах, а также в структурах кремний на изоляторе. Высокая реакционная способность также является необходимым условием для применения пористого кремния в качестве материала для сенсоров высокой чувствительности. Благодаря высокой пористости и возможности регулировать величину пор, пористый кремний возможно использовать как материал для фильтров или датчиков МЭМС.

Работа выполнена при поддержке проекта договор код 0021109, конкурс УМНИК 15-12.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине / Под общей редакцией Шевченко В.Я., Киселева О.И., Соколова В.Н. // СПб.: Изд-во Химиздат – 2015.
2. Морфология и свойства поверхности пористого кремния для адресной доставки лекарств / Спивак Ю.М., Белорус А.О., Селезнев Б.И., Мошников В.А. // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2015. – № 8 (91). – С. 77-80.
3. Исследование фотолюминесценции пористого кремния, полученного методом фотоэлектрохимического травления / Белорус А.О., Кошевой В.Л., Спивак Ю.М., Ле-

- вицкий В.С., Мошников В.А. // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 23 (187). – С. 126-132.
4. Исследование распределения параметра кристалличности для пленок mc-Si, полученных методом PECVD, с помощью Рамановской спектроскопии / Кошевой В.Л., Белорус А.О., Левицкий В.С. // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 19 (183). – С. 118-123.
  5. Исследование фотолюминесценции пористого кремния, полученного методом фотоэлектрохимического травления / Белорус А.О., Кошевой В.Л., Спивак Ю.М., Левицкий В.С., Мошников В.А. // Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики. – 2015. – С. 84-87.
  6. Surface functionality features of porous silicon prepared and treated in different conditions / Spivak Yu.M., Myakin S.V., Moshnikov V.A., Panov M.F., Belarus A.O., Bobkov A.A. // Journal of Nanomaterials. - 2016. - Т. 2016.
  7. Investigation of the influence of etch process upon the morphology of the porous silicon particles / Беспалова К.А., Белорус А.О., Шайдаров Л.В., Третьяков А.В. // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. – 2015. – Т. 7. – С. 10-13.
  8. Исследование поведения наночастиц порошков пористого кремния методом «растекающей капли» / Белорус А.О. // Современная наука: теоретический и практический взгляд; сборник статей Международной НПК / под ред. Сукиасян А.А.. – 2015. – С. 3-10.
  9. Preparation and investigation of porous silicon nanoparticles for targeted drug delivery / Spivak Yu.M., Maraeva E.V., Belarus A.O., Molchanova A.V., Nigmatzyanova N.R. // Smart Nanocomposites. – 2013. – Т. 4. – № 1. – С. 115-118.
  10. Morphology and internal structure of porous silicon powders in dependence on the conditions of post-processing / A. O. Belarus · K. Bepalova · Yu. M. Spivak // Conference Paper – February 2016 – DOI: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448108 – Conference: 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW).
  11. The study of the phase composition of polymorphous silicon film by Raman spectroscopy / V.L. Koshevoi · N.S. Pshchelko · A.O. Belarus · V.S. Levitskiy // Conference Paper · February 2016 – DOI: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448119 – Conference: 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW).
  12. Новые наноматериалы. Синтез. Диагностика. Моделирование: лабораторный практикум / Александрова О.А., Алешин А.Н., Белорус А.О., Бобков А.А., Гузь А.В., Кальнин А.А., Кононова И.Е., Левицкий В.С., Мазинг Д.С., Мараева Е.В., Матюшкин Л.Б., Москвин П.П., Мошников В.А., Муратова Е.Н., Налимова С.С., Пономарева А.А., Пронин И.А., Спивак Ю.М. // Санкт-Петербург, 2015.
  13. Porous silicon nanoparticles for target drug delivery / Belarus A.O., Bepalova K., Bobkov A.A., Permyakov N.V. // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. – 2015. – P. 31-36.
  14. Исследование изменения удельной площади поверхности пористого кремния в зависимости от технологических условий получения методом тепловой десорбции азота / Стебко Д.С., Белорус А.О. // Эволюция современной науки. – 2016. – С. 94-100.