

Рис. 4.

Порог чувствительности ЧЭ по ускорению был определен из отношения сигнал/шум ( $SNR$ ) [7]:

$$SNR = \frac{a_s^2 m Q}{4k_b T \omega_0}, \quad (3)$$

где  $a_s$  — измеряемое ускорение;  $k_b$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура. В качестве шума в выражении (3) выступает броуновский шум ЧЭ. Отношение сигнал/шум полагалось равным 1. Порог чувствительности ЧЭ, имеющего массу 2,3 мг, резонансную частоту порядка 1 кГц и добротность, равную 5, составлял  $1 \cdot 10^{-6}$  м/с<sup>2</sup>, что соответствует порогу чувствительности современных МА.

## Заключение

В ходе работы были исследованы динамические характеристики (резонансная частота и добротность) ЧЭ заданной конструкции. Были получены зависимости резонансной частоты и добротности ЧЭ от давления воздуха в диапазоне от 1 до  $10^5$  Па. Также была исследована зависимость добротности ЧЭ от значения зазора между мембраной ЧЭ и подложкой. Мембрана ЧЭ позволяет увеличить площадь поверхности, создающей сжатие воздуха в зазоре, и за счет этого увеличить коэффициент демпфирования. Экспериментальные данные показали, что для достижения требуемого коэффициента демпфирования необходимо обеспечить воздушный зазор  $\sim 20$  мкм между поверхностью мембраны и подложкой, на которую устанавливается ЧЭ.

## Список литературы

1. Распопов В. Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
2. Kaajakari V. Practical MEMS. Small Gear Publishing, 2009. 460 p.
3. Cooper E. B., Post E. R., Griffith S. et al. High-resolution micromachined interferometric accelerometer // Applied Physics Letters. Vol. 27. 2000.
4. Bannon F. D., Nguyen C. T.-C. High-Q HF Microelectromechanical Filters. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2000. Vol. 35.
5. Blom F. R., Bouwstra S., Elwenspoek M. et al. Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry // Journal of Vacuum Science & Technology B. 1992. Vol. 10.
6. Brotz J. Damping in CMOS-MEMS resonators. Master's project report in Electrical & Computer Engineering at Carnegie Mellon University, 2004. 87 p.
7. Gabrielson T. B. Fundamental noise limits in miniature acoustic and vibration sensors. Warminster, PA, Naval Air Development Center, 1991. 101 p.

УДК 621.3.049.77

О. В. Чуйко, инженер,  
А. Е. Кузнецов, нач. лаб.,  
ФГУ НПК "Технологический Центр", Москва  
e-mail: O. Chuyko@tcen.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР В КАЧЕСТВЕ рН-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Поступила в редакцию 04.10.2011

Исследованы рН-чувствительные элементы, выполненные на основе кремниевых наноструктур. Формирование наноструктур осуществлялось методом "top-down" ("сверху—вниз"). Нанопроволочные структуры характеризуются более высокой чувствительностью. Интегрированный элемент на основе двух нанопроволок р- и n-типов может быть использован в качестве датчика локального относительного изменения концентрации  $[H^+]$ .

**Ключевые слова:** ISFET, рН, кремниевые нанопроволоки, чувствительность

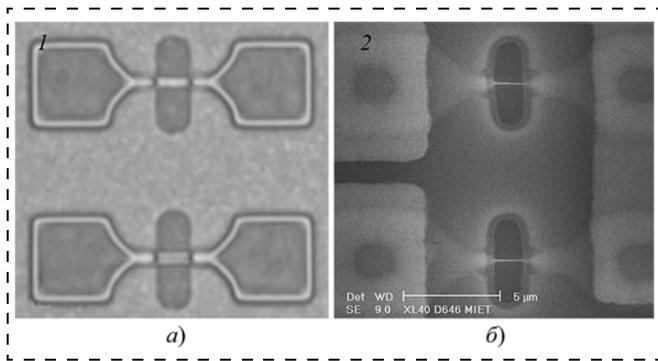
Развитие аналитической химии соответствует общей тенденции миниатюризации техники. Существует объективная необходимость в уменьшении размеров сенсорных элементов, расширении диапазона чувствитель-

ности и качественном изменении их конструкции, позволяющих фиксировать и оценивать прежде недоступные непосредственным измерениям параметры процессов. Все большее распространение получают полифункциональные измерительные ячейки, позволяющие проводить одновременные измерения нескольких физических величин исследуемого объекта, в частности концентрацию  $[H^+]$ .

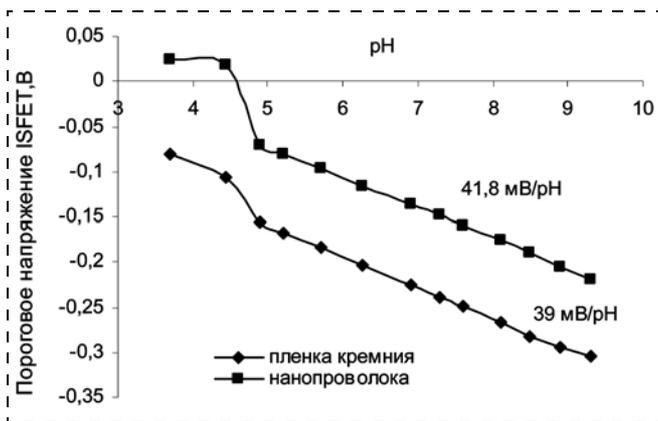
В работе рассмотрены возможности использования различных наноструктур кремния в качестве рН-чувствительных элементов. Формирование наноструктур осуществлялось методом "top-down" ("сверху—вниз") с использованием литографических приемов конструирования.

Технология изготовления рН-чувствительных элементов на основе кремниевых наноструктур включает в себя комбинацию двух основных этапов: формирование кремниевых структур с наноразмерами и последовательность операций КМОП-процесса. Нанопроволочные элементы изготавливались на двух типах структур — кремнии на изоляторе (КНИ) и поликремнии методами фотолитографии и последовательного утонения окислением с вариацией по длине и ширине проволок.

Далее последовательностью технологических операций формировались n-канальные транзисторы с длиной канала от 0,5 до 0,8 мкм и диаметром кремниевой про-



**Рис. 1. Нанопроволока:**  
а — оптическое изображение; б — РЭМ изображение



**Рис. 2. Зависимость порогового напряжения ISFET от рН**

волоки 20...100 нм. На заключительном этапе проводилось вскрытие проволоки для возможности непосредственного взаимодействия с раствором электролита.

Для исследования характеристик рН-чувствительных элементов на поверхности кремниевых наноструктур формировали низкотемпературный ультратонкий слой SiO<sub>2</sub> толщиной ~0,2 нм методом плазменного окисления.

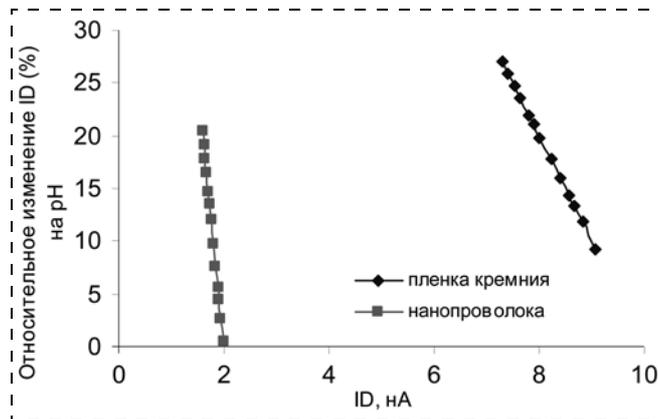
Исследовали два вида конструкций ионно-чувствительного полевого транзистора (ISFET): на основе "двумерной" наноструктуры (пленка кремния) и "одномерной" наноструктуры (проволока) (рис. 1).

ISFET — МОП-транзисторная структура, где в качестве металлического затвора выступает раствор электролита. В зависимости от кислотно-основных свойств раствора происходит изменение электрохимического потенциала и перезарядка поверхности.

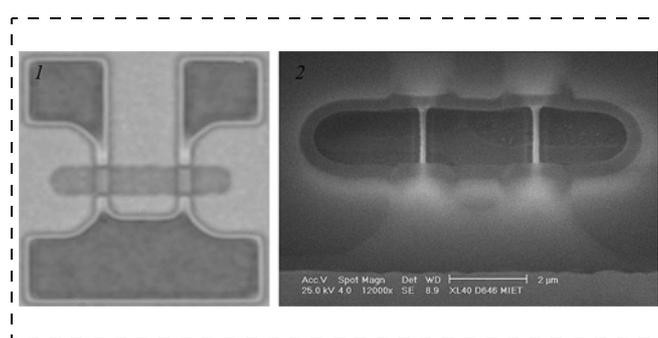
На полученных структурах определялась чувствительность к рН по напряжению и току. На рис. 2 представлена зависимость изменения порогового напряжения ISFET ( $V_T$ ) от значений рН тестовых растворов для двух типов конструкций. В качестве затвора был использован золотой электрод сравнения.

Наклон характеристик дву- и одномерной наноструктур составил соответственно 39 мВ/рН и 41,8 мВ/рН. В идеальных условиях чувствительность структуры к рН согласно теоретическим данным составляет 59 мВ/рН.

На рис. 3 представлен график относительной чувствительности по току к рН для двух типов конструкций ISFET.



**Рис. 3. График относительной чувствительности по току**



**Рис. 4.**  
1 — оптическое изображение элемента, выполненного на основе двух нанопроволок *n*- и *p*-типа; 2 — РЭМ изображение элемента, выполненного на основе двух нанопроволок *n*- и *p*-типа

Преимущество одномерных структур по сравнению с двумерными по отношению к рН-чувствительности по напряжению составляет 7 %, по току — 25 %.

В целях определения влияния поверхности чувствительного элемента к рН поверхность наноструктур была силинирована АРТЕС ((3-аминопропил)-триэтоксисилан) [1].

АРТЕС был выбран как один из наиболее широко используемых линкеров для ковалентной иммобилизации биомолекул на поверхность оксида кремния.

После силинизации чувствительность структур к рН составила порядка 10 мВ/рН. Снижение рН-чувствительности элемента после силинизации АРТЕС может объясняться формированием сложной поверхности, которая состоит из двух функциональных групп Si—ОН и аминогрупп NH<sub>2</sub>, в результате чего меняется буферная емкость поверхности [2]. Чувствительность к рН сильно зависит от свойств и морфологии поверхности сенсорного элемента вследствие изменения природы и числа групп, участвующих в протолитических реакциях.

Рабочие характеристики биосенсоров зависят от условий среды: буферной емкости, ионной силы раствора и рН [3]. Поэтому возникает необходимость исключить влияние внешней среды на работу устройства. Так, после силинизации чувствительность структур к рН была сведена к минимуму.

В целях создания датчика относительного изменения значения рН с высокой чувствительностью были исследованы нанопроволочные элементы на основе двух нанопроволок *n*- и *p*-типа ("инвертор"), выполненные на КНИ-структурах и поликремнии (рис. 4). На рис. 5

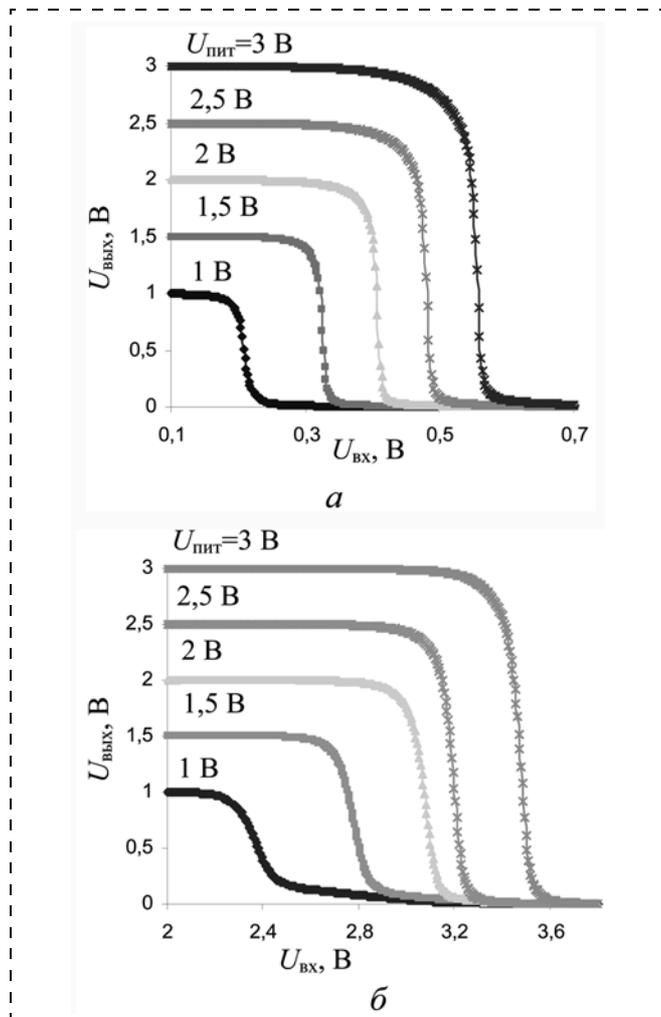


Рис. 5. Передаточная характеристика "инвертора", выполненного на структурах КНИ (а), поликремнии (б)

представлены передаточные характеристики "инверторов" с вариацией по напряжению питания.

Коэффициент усиления "инвертора" составил для КНИ-структур от 30...150, для структур, выполненных на поликремнии, — 5...30. Коэффициент усиления можно варьировать напряжением питания для достижения максимального значения. Максимальная чувствительность для данных структур к рН достигает 5 В/рН.

Коэффициент усиления  $K$  "инвертора" зависит от молярности раствора (рис. 6). Максимальная чувствительность к рН исследуемых структур будет достигаться при

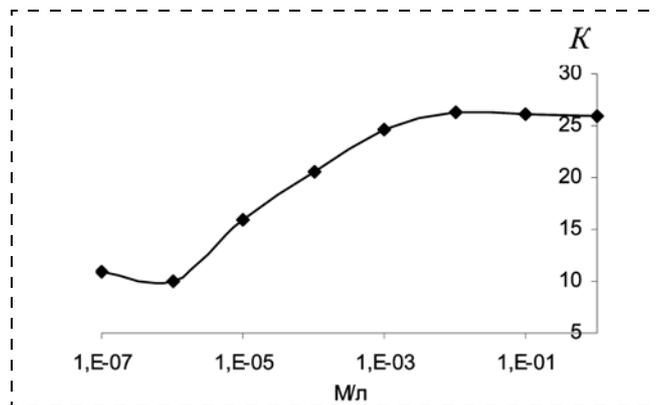


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления  $K$  от молярности раствора

молярности раствора, равной  $10^{-2}$  М. Таким образом, сенсорный элемент на основе двух нанопроволок  $n$ - и  $p$ -типа может быть использован и в качестве датчика определения молярности растворов.

Исследования кремниевых наноструктур, используемых в качестве рН-чувствительных элементов, показали перспективность их применения в сложных аналитических микросистемах "лаборатория на чипе". Миниатюризация сенсоров открывает возможность для изучения распределения градиента рН по активной поверхности или даже в микрообъемах вплоть до клетки [4, 5]. Высокая чувствительность датчика относительного изменения концентрации  $[H^+]$  имеет большое значение для контроля протекания биохимических реакций, а формирование нанопроволочных систем на поликремнии позволит значительно снизить стоимость приборов.

При проведении экспериментальных исследований использовалось оборудование ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический центр": измерительная система Agilent Technologies HP 4145A.

#### Список литературы

1. **Ulman A.** An Introduction to Ultrathin Organic Films from Langmuir Blodgett to Self-assembly // IEEE Transistors. 1991. Vol. 37. P. 56–62.
2. **Morrall S. W., Leyden D. E.** Surfaces and Interfaces Symposium // Science. 1996. Vol. 1. P. 45–55.
3. **Bergveld P.** Biosensors and Bioelectronics // IEEE Transistors. 1995. Vol. 10. P. 37–44.
4. **Bergveld P., Sibbald A.** Analytical and Biomedical Application of Ion-selective Field-effect Transistors // Elsevier Science Publishers. 1988. Vol. 12. P. 47–51.
5. **Bashir R.** Miniaturisation for chemistry, biology and bioengineering // Sensors and Actuators. 2009. Vol. 9. P. 21–27.