

ПРЕКОНЦЕНТРАТОР ГАЗОВОЙ СИСТЕМЫ «ЭЛЕКТРОННЫЙ НОС»*Хатько В.В.*

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

На основании данных моделирования показана возможность использования подложек из нанопористого анодного оксида алюминия для изготовления преконцентратора газовой системы «Электронный нос». При использовании нанопористого анодного оксида алюминия требуемый диапазон температур 500–600 К по площади преконцентратора может быть достигнут при более низких значениях потребляемых мощностей по сравнению с кремниевой подложкой. (E-mail: viacheslav.khatko@gmail.com)

Ключевые слова: нанопористый анодный оксид алюминия, преконцентратор, газовая система «Электронный нос».

Введение

Потребность во всевозможных сенсорах и системах мониторинга различных газовых сред постоянно возрастает. Это связано с безопасностью условий труда на предприятиях, загрязнением окружающей среды, обнаружением и предотвращением потенциальных террористических актов, а также с необходимостью строгого контроля технологических процессов. Перспективный путь развития сенсорной техники – применение мультисенсорных систем на основе неселективных материалов и методов обработки данных, полученных от таких сенсорных систем на базе современных достижений в распознавании образов. К таким системам относится «Электронный нос» – аналитическое устройство, сочетающее в себе массив неселективных сенсоров, обладающих высокой перекрестной чувствительностью и способностью к распознаванию образов, и многомерную калибровку для обработки данных от такого массива [1]. Если данную систему дополнить еще одним модулем – интегральным преконцентратором, обеспечивающим программируемую термическую адсорбцию-десорбцию токсичных газов с уровнем концентрации в 1 ppb (одна молекула на миллиард), то данная микросистема будет обладать высокой чувствительностью [2]. Преконцентратор изготавливается путем нанесения адсорбционных слоев на поверхность одной или нескольких кремниевых мембран с пленочными термическими нагревателями. Для повышения концентрационного

коэффициента до 10^4 используются наноструктурированные пористые материалы в качестве адсорбционного вещества. Таким образом, система «Электронный нос» в перспективе должна включать 4 отдельных модуля: преконцентратор, модуль химических сенсоров, электронную систему питания и программное обеспечение контроля и обработки сигнала.

В настоящее время макетные образцы преконцентраторов, как правило, изготавливаются на кремниевых пластинах с использованием микросистемных технологий. Согласно им на пластинах кремния методом объемного травления кремния формируются двухслойные ($\text{SiN}_x\text{-SiO}_2$) или трехслойные ($\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$) диэлектрические мембраны с тонкопленочными нагревателями. Затем на области мембран наносится мезопористый материал с высоким коэффициентом абсорбции к газам [3]. К настоящему моменту работы по созданию образцов 4-х модульной микросистемы «Электронный нос» (с преконцентратором на основе кремния) ведутся во Франции, Испании и России. Использование другого материала в качестве подложки, как основы для изготовления преконцентратора, не известно.

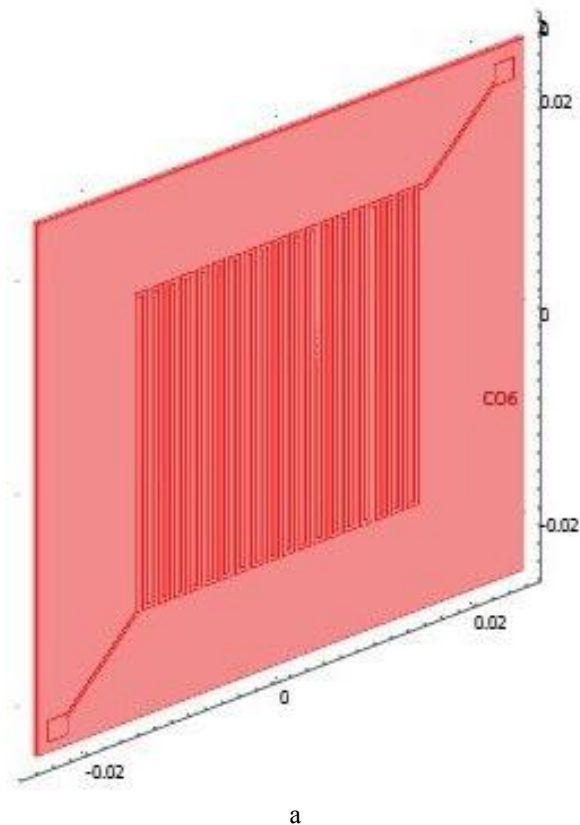
Целью работы является анализ возможности (по данным моделирования) использования подложек из пористого анодного оксида алюминия для изготовления интегрального преконцентратора системы «Электронный нос», обеспечивающих достижение температур в диапазоне 500–600 К по площади преконцентратора, необходимых для осуществле-

ния режима адсорбции-десорбции токсичного газа.

Результаты и их обсуждение

В основе данного исследования лежит идея (впервые сформулированная в работе [4]), согласно которой макетные образцы газовой микросистемы «Электронный нос» создаются на основе интегрального преконцентратора и модуля химических сенсоров, изготавливаемых одновременно с использованием микросистемных технологий на подложках из нанопористого анодного оксида алюминия. Ранее, в работах [5, 6], методами конечно-элементного моделирования для компонентов тензоров упругости и теплопроводности пористого анодного оксида алюминия были получены зависимости его термомеханических параметров от пористости. Эти зависимости были использованы при разработке конструкций химического сенсора с низким уровнем потребляемой мощности и 4-х сенсорной газовой микросистемы на подложках, изготавливаемых из нанопористого анодного оксида алюминия.

Конструкция преконцентратора представляла собой вытравленную с планарной стороны нанопористой подложки анодного оксида алюминия, имеющей размер 50×50 мм² и толщину 0,5 мм, область с каналом в форме меандра (рисунок 1а), который заполнялся веществом с высокой адсорбционной способностью на основе мезопористого SiO₂, цеолита или вещества на основе высокоактивного углерода Carborack X (рисунок 1б). Пористость подложки равнялась порядка 10 об. %. Размер области преконцентратора составлял 30×30 мм², ширина и глубина вытравленного канала равнялись 0,4 мм, соответственно. Расстояние между вытравленными каналами меандра составляло 0,4 мм. Выбор размеров вытравленного канала определялся размерами гранул адсорбента, величина которых, например, для Carborack X составляет 250–350 мкм [7]. С обратной стороны подложки, повторяя форму канала, формировался платиновый нагреватель с шириной и толщиной дорожки 0,4 и 0,02 мм соответственно. При моделировании параметров преконцентратора в качестве адсорбируемого вещества выбран диоксид кремния со структурой α -кварца.



а



б

Рисунок 1 — Конструкция преконцентратора (а) и область преконцентратора с нанесенным адсорбентом Carborack X (б)

Используя метод, развитый в работах [5, 6], и теоретическую зависимость поперечного и продольного коэффициентов теплопроводности оксида алюминия от пористости, первоначально определялись значения напряжения питания преконцентратора, при которых область с адсорбирующим веществом имела бы температуру порядка 500–600 К, т.е. температуру пере-

хода данного вещества от режима адсорбции активного газа к режиму его десорбции с поверхности адсорбента. На рисунке 2 показано распределение температуры в преконцентраторе, изготовленном на подложках из нелегированного кремния и нанопористого анодного оксида алюминия, при напряжении на нагревателе 15 и 30 В.

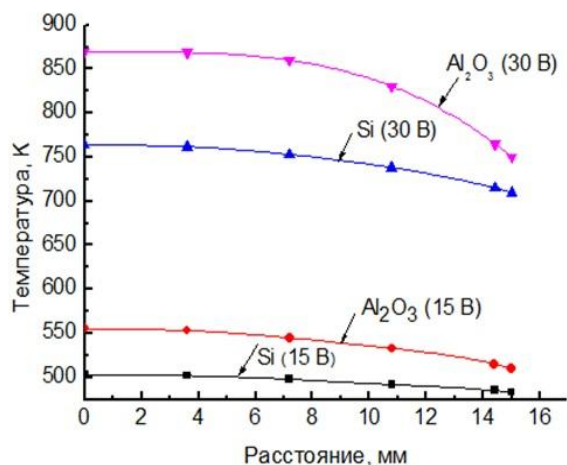


Рисунок 2 – Зависимость температуры на преконцентраторе от расстояния от центра преконцентратора вдоль оси, перпендикулярной длинному плечу меандра нагревателя, при напряжении питания на нагревателе 15 и 30 В

Анализ распределения температур показывает, что для подложки из нанопористого анодного оксида алюминия оно является менее однородным по ширине области преконцентратора, содержащего адсорбирующее вещество. Так, перепад температур (ΔT) от края до центра протравленной области при напряжении питания 15 В составляет ~ 45 К при изменении температуры соответственно от 510 до 555 К. Для кремниевой подложки $\Delta T \sim 20$ К при изменении температуры соответственно от 483 до 503 К. При напряжении питания 30 В на преконцентраторе данная величина составляла для подложек из анодного оксида алюминия и кремния $\Delta T \sim 870 - 750 = 120$ К и $\Delta T \sim 764 - 710 = 54$ К соответственно. В данном случае увеличение неоднородности распределения температуры в подложке из нанопористого анодного оксида алюминия связано с зависимостью поперечной составляющей коэффициента теплопроводности от пористости, как $\chi' = (1 - 4/3 n)\chi$ [5, 6], где χ и χ' – коэффициенты поперечной теплопроводности при нулевой и ненулевой пористости n . Учитывая данную зависимость, можно целенаправленно, путем выбора исходной величины

пористости подложки, увеличивать или уменьшать однородность распределение температуры по области нагрева преконцентратора.

Из вышеприведенного анализа видно, что уже при напряжении на нагревателе 15 В по площади преконцентратора обеспечивается требуемый диапазон температур 500–600 К, при котором происходит переход от режима адсорбции токсичного газа к режиму его десорбции с поверхности адсорбента. На рисунке 3 приведены зависимости максимальной температуры адсорбента, нанесенного на область преконцентратора, изготовленного на нанопористой алюмооксидной (1) и кремниевой (2) подложках, от напряжения на нагревателе. Видно, что при использовании нанопористого анодного оксида алюминия требуемый диапазон температур 500–600 К может быть достигнут при более низких значениях потребляемой мощности.

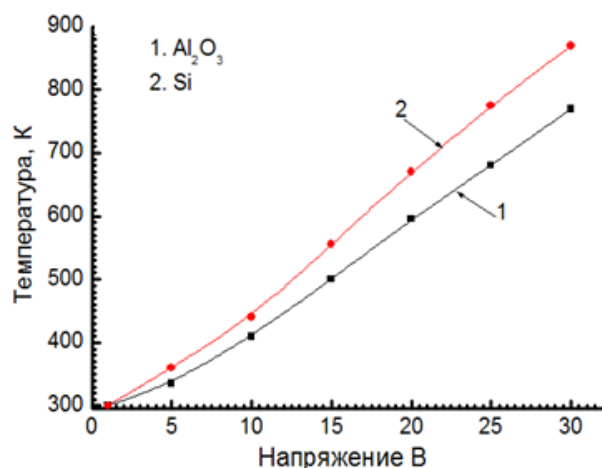


Рисунок 3 – Зависимость температуры адсорбента, нанесенного на преконцентратор, от напряжения на нагревателе: 1 – подложка из нанопористого оксида алюминия; 2 – из кремния

Таким образом, в настоящей работе на основании данных моделирования показана возможность использования подложек из нанопористого анодного оксида алюминия для изготовления интегрального преконцентратора газовой системы «Электронный нос». Снижение неоднородности распределения температуры для этих подложек возможно осуществить уменьшением как их толщины, так и размеров канала травления преконцентратора при использовании адсорбентов с размером гранул от единиц до десятков микрометров. Использование в перспективе данных подложек толщиной

порядка 100 мкм позволит создать однокристалльную, состоящую из преконцентратора и блока газовых сенсоров, селективную и высокочувствительную микросистему «Электронный нос», предназначенную для детектирования предельно низких концентраций газов. В силу своих небольших размеров она может найти широкое применение в различных областях деятельности человека, как мобильное и достаточно дешевое устройство экспресс-диагностики.

Заключение

1. На основании данных моделирования показана возможность использования для изготовления интегрального преконцентратора газовой системы «Электронный нос» подложек из нанопористого анодного оксида алюминия, которые позволяют уменьшить потребляемую мощность системы в целом.

2. При использовании нанопористого анодного оксида алюминия требуемый диапазон температур 500–600 К по площади преконцентратора может быть достигнут при более низких значениях потребляемых мощностей по сравнению с кремниевой подложкой.

Автор выражает благодарность магистрантам кафедры микро- и нанотехника БНТУ Белогурову Е.А. и Шукевичу Я.И. за помощь в компьютерном моделировании параметров преконцентратора.

Работа частично финансировалась в рамках государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Конвергенция».

Список использованных источников

1. J. Gardner, P. Bartlet, A brief history of electronic noses // *Sensors and Actuators B*, 18-19 (1994) 211-220.
2. S. C. Terry, J. H. Jerman, J. B. Angell, A gas chromatograph air analyzer fabricated on a silicon wafer // *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. 26, pp. 1880–1884, 1979.
3. M. Kim, S. Mitra, A microfabricated microconcentrator for sensors and gas chromatography, *Journal of Chromatography A*, 996 (2003) 1–11.
4. Ю.М. Плескачевский, В.В. Хатько, Г.Г. Горох, И.А. Таратын, Перспективные газовые микросистемы на основе наноструктурированных материалов для космического приборостроения // *Материалы 5-го белорусского космического конгресса* // В 2 Т. (25-27 октября 2011 г., Минск) – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2011. – Т. 1. – С. 95-98.
5. Е.А. Белогуров, Я.И. Шукевич, В.В. Баркалин, В.В. Хатько, И.А. Таратын, Конструирование газовых микросистем на основе нанопористого анодного оксида алюминия // *Приборы и методы измерений*, 2011 г., №2. – С. 59-65.
6. В.В. Баркалин, Е.А. Белогуров, И.А. Таратын, В.В. Хатько, Я.И. Шукевич, Конечное элементное моделирование термомеханических свойств нанопористых материалов // *Нано- и микросистемная техника*. – 2012. - № 1. – С. 18-24.
7. V. Fierro, V. Torné-Fernández, D. Montané, A. Celzard, Adsorption of phenol onto activated carbons having different textural and surface properties // *Microporous and Mesoporous Materials* 111 (2008) 276-284.

Khatko V.V.

Preconcentrator of gas system «Electronic nose»

The opportunity of nanoporous anodic alumina substrate utilization for the manufacture of the preconcentrator of gas system «Electronic nose» is shown. Optimization of temperature distribution in the preconcentrator area containing adsorbent could be possible by the choice of the basic parameters of the alumina substrate and preconcentrator geometry. (E-mail: viacheslav.khatko@gmail.com)

Key words: nanoporous anodic alumina, preconcentrator, gas system «Electronic nose».

Поступила в редакцию 23.07.2012.