

**ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ДВУХСЕНСОРНАЯ  
МИКРОСИСТЕМА НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ  
ПОДЛОЖКЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ  
ГАЗОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ**

**А.И. Захлебаева<sup>1</sup>, О.Г. Реутская<sup>2</sup>,  
Г.Г. Горох<sup>1</sup>, И.А. Таратын<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники, Минск, Беларусь, [zakhlebayeva@bsuir.by](mailto:zakhlebayeva@bsuir.by)*

*<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск,  
Беларусь, [oreutskaya@gmail.com](mailto:oreutskaya@gmail.com)*

*<sup>3</sup>ОАО Минский научно-исследовательский институт  
радиоматериалов, Минск, Беларусь, [mems.irma@gmail.com](mailto:mems.irma@gmail.com)*

Разработана конструкция и технология изготовления двухсенсорной газовой микросистемы на подложке из нанопористого анодного оксида алюминия. Исследованы электрофизические характеристики разработанной микросистемы, получены отклики к воздействию активных газов.

Одним из путей улучшения рабочих характеристик сенсорных микросистем для контроля состава окружающей среды является использование в их конструкции нанопористых подложек из анодного оксида алюминия (АОА). Хорошая механическая прочность АОА позволяет формировать на одном кристалле микросистемы, содержащие несколько сенсоров, сохраняя при этом размеры однокристалльной структуры [1]. Структурирование сформированных по золь-гель технологии металлооксидных газочувствительных слоев обеспечивает высокие сенсорные отклики на ряд токсичных и горючих газов. Изготовление на одной подложке мультисенсорных микросистем с различными газочувствительными слоями позволяет проводить распознавание состава многокомпонентных газовых сред.

В данной работе представлены результаты разработки конструкции и технологии формирования, а также исследования электрофизических характеристик двухсенсорной микросистемы на подложке из АОА.

*Изготовление сенсоров на подложках из анодного оксида алюминия.* Подложки из АОО толщиной  $60 \pm 1$  мкм и пористостью 25-55% изготавливали методом двухстадийного электрохимического анодирования в 0,5 М растворе щавелевой кислоты при напряжении анодирования 50 В [1,2]. На первой стадии анодирования формировали первичный неупорядоченный слой АОО, после чего проводили его селективное растворение. На второй стадии анодирования по отпечаткам оксидных ячеек, оставшимся на поверхности алюминия после удаления первичного слоя АОО, формировали слой упорядоченного оксида.

Был разработан технологический маршрут изготовления кристалла газового сенсора на АОО подложке [2]. На планарную сторону подложки методом магнетронного распыления осаждали слой платины, после чего методами фотолитографии и ионно-лучевого травления формировали нагреватель и электроды с контактными площадками. За счет шероховатости пористой поверхности, а также частичного проникновения платины в открытые верхние части пор, пленка приобретала структурированную поверхность и высокую адгезию к подложке, которая сохранялась при многократных температурных перепадах.

Формирование сквозных окон для минимизации тепловых потерь в конструкции сенсора проводили по разработанной в ОАО Минский НИИ радиоматериалов инновационной технологии микромеханической обработки нанопористого анодного оксида алюминия, которая заключалась в химическом травлении анодного оксида через маску V-Al, сформированную на планарной и обратной сторонах подложки магнетронным распылением с последующей фотолитографией.

Газочувствительный металлооксидный слой изготавливали золь-гель методом и наносили капельным методом из раствора на соответствующую область нагревателя таким образом, чтобы пленка замыкала собой концы сигнальных электродов. Для создания хорошего контакта к платиновым электродам и формирования необходимой структуры слоя проводили соответствующую термообработку нанесенного слоя.

Технологический маршрут изготовления сенсора на подложке из АОО схематически показан на рисунке 1.

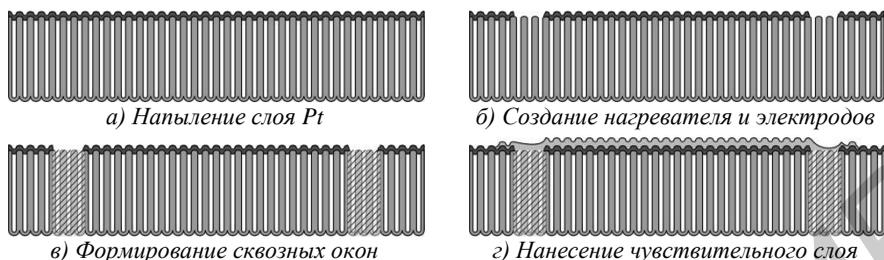


Рис. 1. Технологический маршрут формирования сенсора на АОА подложке

*Конструкция и технология изготовления двухсенсорной микросистемы.* Конструкция двухсенсорной газовой микросистемы представлена на рисунке 2. Технологический маршрут изготовления кристалла микросистемы аналогичен описанному выше маршруту изготовления кристалла газового сенсора на АОА подложке.

Сформированный кристалл микросистемы, изготовленный на подложке АОА толщиной 60 мкм и пористостью ~ 35%, имеет размер 1,25×1,25 мм. На планарной стороне кристалла сформированы две пары платиновых информационных электродов шириной 50 мкм с нанесенными чувствительными слоями, на обратной стороне – два нагревательных элемента шириной 30 мкм в форме меандра. Расстояние между электродами – 10 мкм, толщина электродов и нагревателей – 5 мкм. Были изготовлены микросистемы с газочувствительными слоями  $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$  и  $\text{SnO}_2+\text{Pt}-\text{Pd}$ .

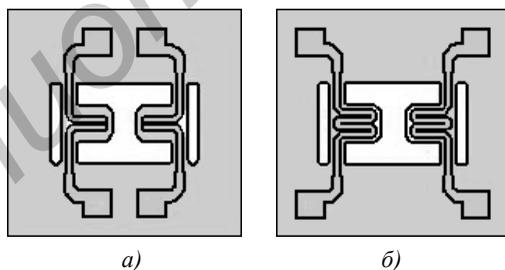


Рис. 2. Конструкция информационных электродов (а) и нагревательных элементов (б) двухсенсорной микросистемы

Использование в топологии газовой микросистемы сквозных отверстий, как и использование самой нанопористой диэлектрической подложки, позволяет снизить потребляемую мощность микросистемы за счет уменьшения объема контактирующего с нагревателем

материала подложки и уменьшения коэффициента теплопроводности АОА, зависящего от его пористости [3].

Изготовленные кристаллы микросистемы были разварены в шестивыводной металлический корпус для проведения дальнейших электрофизических измерений. Фотографии микросистемы в корпусе представлены на рисунке 3.

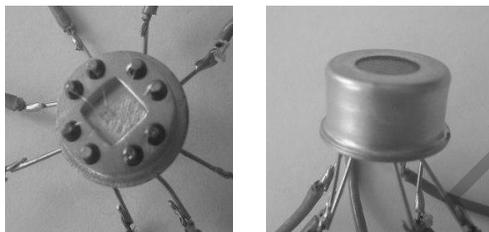


Рис. 3. Микросистема в корпусе

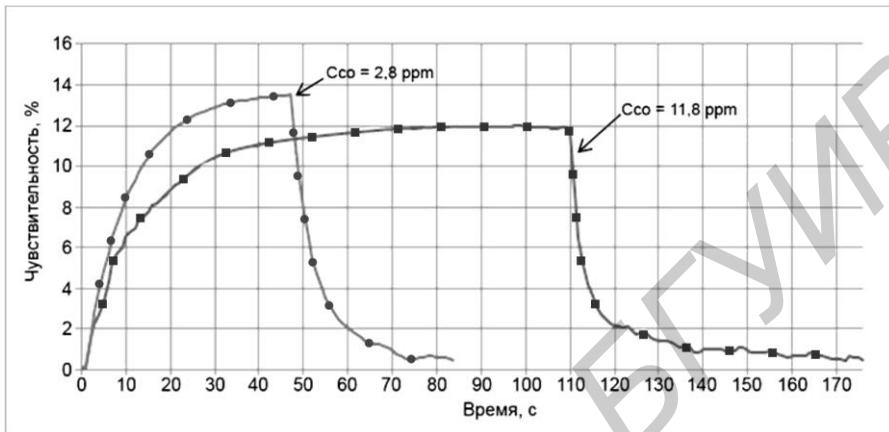
#### *Измерение характеристик микросистемы.*

Исследование откликов микросистемы на активные газы проводили на экспериментальном стенде, состоящем из измерительной ячейки, системы создания и поддержания заданной газовой среды в ячейке и приборов измерения электрических сигналов. В качестве поверочных газовых смесей использовали газовые смеси с содержанием 2,8 ppm CO, 11,8 ppm CO, 4 ppm NO<sub>2</sub> и 100 ppm C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>. Величину сенсорного отклика определяли как разность между сопротивлением сенсоров при воздействии активного газа ( $R_{gas}$ ) и сопротивлением сенсоров в воздухе ( $R_{air}$ ). Чувствительность микросистемы определяли как процентное отношение  $R_{gas}$  и  $R_{air}$ :  $S = [(R_{air}-R_{gas})/R_{gas}] \times 100\%$ . Результаты измерений чувствительности микросистемы к C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, NO<sub>2</sub> и CO приведены в таблице 1.

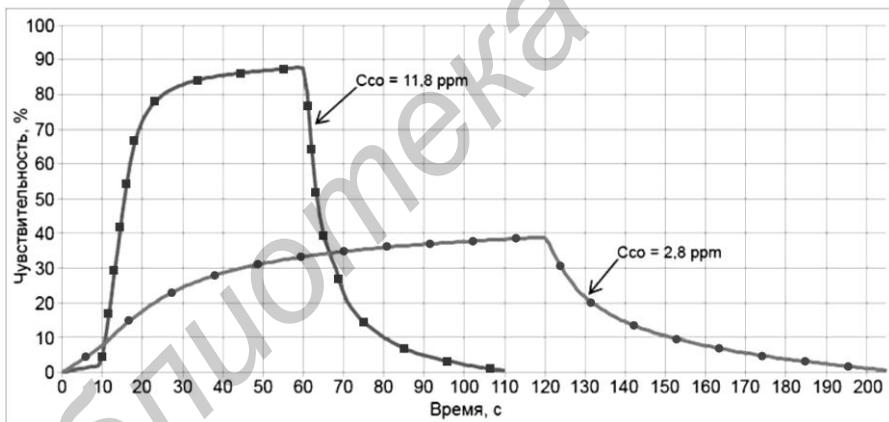
Таблица 1 – Чувствительность газовой микросистемы к C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, NO<sub>2</sub>, CO

Потребляемая мощность	Концентрация детектируемого газа, ppm	Чувствительность, %
48 мВт	C(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) = 100	55
	C(NO <sub>2</sub> ) = 4	82
60 мВт	C(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) = 100	73
	C(NO <sub>2</sub> ) = 4	72
85 мВт	C(CO) = 11,8	12
	C(CO) = 2,8	15
15 мкВт	C(CO) = 11,8	90
	C(CO) = 2,8	40

На рисунке 4 приведены изотермические отклики микросистемы с чувствительным слоем  $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$  при воздействии  $\text{CO}$ , полученные в различных режимах измерения.



а) Режим измерения:  $I=61 \text{ мА}$ ,  $U=1,4 \text{ В}$ ,  $N=85,4 \text{ мВт}$



б) Режим измерения:  $I=61 \text{ мА}$ ,  $U=1,4 \text{ В}$ , отжиг  $t=5 \text{ сек}$ , переход в  $I=11 \text{ мА}$ ,  $U=0,118 \text{ В}$ ,  $N=14,1 \text{ мВт}$

Рис. 4. Отклики микросистемы к  $\text{CO}$  при мощности 85,4 мВт (а) и 14,1 мВт (б)

При проведении измерений в первом режиме устанавливали значения рабочих токов и напряжений сенсоров равными  $I = 61 \text{ мА}$  и  $U = 1,4 \text{ В}$ , спустя 5–10 мин., после выхода сопротивления микросистемы на «постоянное» значение, проводили измерения сенсорного отклика на 2,8 ppm и 11,8 ppm  $\text{CO}$  при мощности  $N = 85,4 \text{ мВт}$ . Полученные результаты представлены на рис. 4, а.

Во втором режиме измерения после кратковременной (в течение 5 сек) работы сенсоров в режиме  $I = 61 \text{ мА}$ ,  $U = 1,4 \text{ В}$ , значения рабочего тока и напряжения снижали до  $I = 11 \text{ мА}$ ,  $U = 0,118 \text{ В}$ , после чего фиксировали отклики микросистемы на 2,8 ppm и 11,8 ppm CO, при этом величина потребляемой мощности снижалась до  $N = 14,1 \text{ мкВт}$  (рис. 4, б). Данный режим позволяет получить более высокий сенсорный отклик и снизить потребляемую мощность системы в целом, как показано на рис. 4.

Таким образом, варьируя режимами измерения, а также составом чувствительных слоев можно управлять чувствительностью и избирательностью микросистемы по отношению к различным газам. Использование в конструкции микросистемы нанопористой подложки из АОА позволяет существенно повысить ее чувствительность и понизить потребляемую мощность. Полупроводниковые газовые микросистемы на наноструктурированных подложках могут быть использованы в инновационных системах обеспечения безопасности жизнедеятельности человека и охраны окружающей среды.

### **Литература**

1. Газовая микросистема на подложке из пористого анодного оксида алюминия / О.Г. Реутская [и др.] // Наноструктуры в конденсированных средах : сб. науч. ст. / Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2014. – С. 138–145.

2. Химические газовые сенсоры на подложках из нанопористого оксида алюминия / Г.Г. Горох [и др.] // Нано- и микроэлектронная техника. – 2014. – №9. – С. 45–51.

3. Конечно-элементное моделирование термомеханических свойств нанопористых материалов / В.В. Баркалин [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 1. – С. 18-24