

УДК 51-73

## ЧЕТЫРЕХСЕНСОРНАЯ ГАЗОВАЯ МИКРОСИСТЕМА НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ: КОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Реутская О.Г.<sup>1</sup>, Белогуров Е.А.<sup>2</sup>, Таратын И.А.<sup>1</sup>, Хатько В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Минский НИИ радиоматериалов, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

*Разработаны конструкция и технология создания 4-сенсорной газовой микросистемы, изготавливаемой на подложках из нанопористого анодного оксида алюминия. Методом конечных элементов проведено моделирование температуры основных ее элементов и термомеханических деформаций, возникающих в конструкции при различных режимах работы микросистемы. (E-mail: viacheslav.khatko@gmail.com)*

**Ключевые слова:** пористый анодный оксид алюминия, четырехсенсорная газовая система, метод конечных элементов.

### Введение

Одним из перспективных решений, применяемых для повышения селективности газовых сенсорных систем, является создание матриц из сенсоров (мультисенсорные системы), имеющих различные физические свойства и (или) параметры чувствительного слоя. Изготовление модуля химических сенсоров на одном кремниевом кристалле выступает одним из перспективных направлений в развитии газовой сенсорики.

К настоящему моменту в мире существует несколько технологий создания мультисенсорных систем. Первая из них разработана в исследовательском центре университета г. Карлсруе и использует матрицу из 38 сенсоров, сформированных путем нанесения системы полосковых микроэлектродов на поверхность чувствительной полупроводниковой пленки и ее пространственно-неоднородный нагрев с помощью микронагревателей [1]. Различная температурная зависимость отклика полупроводниковой пленки для каждого газа позволяет по набору сопротивлений элементов матрицы провести анализ состава атмосферы, окружающей мультисенсорную систему. Недостатком данной технологии является высокое энергопотребление данной сенсорной системы. Вторая технология создана в Национальном центре микроэлектроники в г. Барселона [2]. С помощью этой технологии на диэлектрической мем-

бране, созданной путем объемного травления кремниевой подложки, размещаются четыре химических сенсора, имеющих попарно различную систему встречно-штыревых электродов. Недостатками данной мультисенсорной системы являются нестабильность параметров поликремниевого нагревателя, расположенного на мембране, и низкий уровень рабочих температур сенсоров.

Целью данной работы являлась разработка конструкции и технологии изготовления 4-сенсорной газовой микросистемы на диэлектрической подложке из пористого анодного оксида алюминия, а также моделирование ее основных свойств и параметров методом конечных элементов. Ожидалось, что мультисенсорная микросистема, выполненная с использованием диэлектрической подложки на основе нанопористого анодного оксида алюминия, устранит все отмеченные недостатки прототипов и повысит чувствительность и селективность микросистемы к детектируемым газам [3].

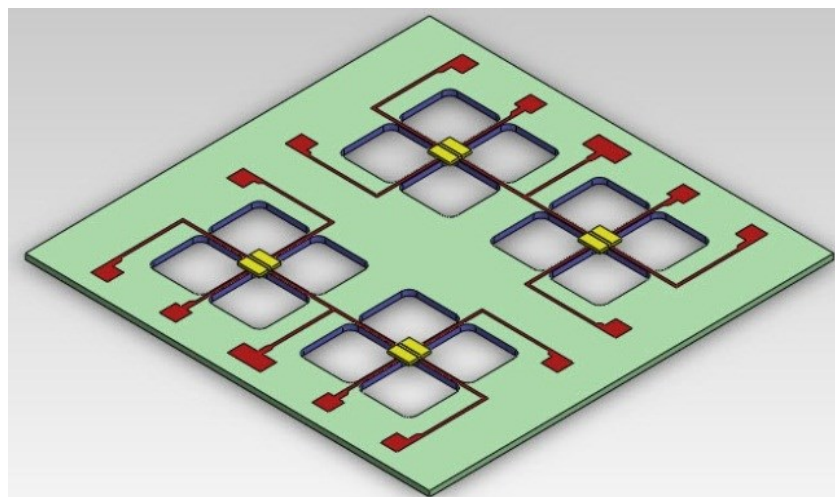
### Конструкция и технология изготовления микросистемы

На рисунке 1 представлены две топологии разработанной газовой микросистемы. Их отличие связано с различным видом платинового микронагревателя, толщина которого в обоих случаях составляет 0,5 мкм. В первом случае

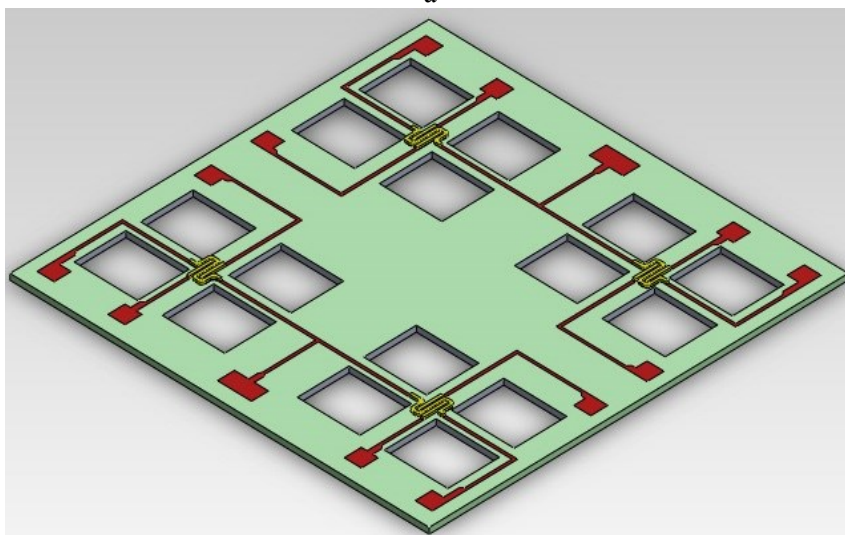
нагревателем служит полоска платины, во втором – нагреватель выполнен в виде меандра. Платиновые электроды для снятия сигнала с полупроводникового чувствительного слоя, осаждаемого на систему из нагревателя и электродов, расположены перпендикулярно к нагревателю и образуют с ним зазор в 5–25 мкм. Толщина платиновых электродов к чувствительному слою составляет 0,5 мкм. Кристалл микросистемы, изготовленный на подложке нанопористого анодного оксида алюминия (пористость ~ 15 %), имеет размер  $3,7 \times 3,7$  мм и толщину 50 мкм. Другой отличительной особенностью двух топологий, кроме вида нагревателя, является размер площадки под системой из нагревателя и электродов. Для системы с нагревателем в виде

полоски и меандра он составляет  $45 \times 45$  мкм и  $400 \times 400$  мкм соответственно. Большой размер площадки для нагревателя в виде меандра позволяет увеличить общую площадь чувствительного слоя. Использование в топологии микросистемы сквозных отверстий, как и использование самой нанопористой диэлектрической подложки, призвано снизить потребляемую мощность газовой микросистемы за счет уменьшения объема, контактирующего с нагревателем материала подложки, и уменьшения коэффициента теплопроводности алюмооксидной подложки, зависящего от ее пористости [4].

Технология изготовления газовой микросистемы состоит из нескольких основных блоков технологических операций.



а



б

Рисунок 1 – Топология 4-сенсорной газовой микросистемы с нагревателем в виде полоски (а) и меандра (б). Толщина платинового нагревателя и электродов 0,5 мкм

Первый блок, связанный с созданием системы платиновых нагревателя и электродов с контактными площадками, включает осаждение многослойной системы металлических пленок (Pt, V и Al) на планарную сторону диэлектрической подложки (рисунок 2а), где двухслойная система V–Al выступает в дальнейшем в качестве маски при формировании топологии нагревателя и электродов. Затем, после фотолитографической операции, проводят травление алюминия и ванадия соответствующими химическими травителями и платины – ионно-лучевым травлением (рисунок 2б, фоторезист на алюминии не показан). После химического удаления фоторезиста (Al и V) формируют топологию нагревателя и электродов с контактными площадками (рисунок 2в).

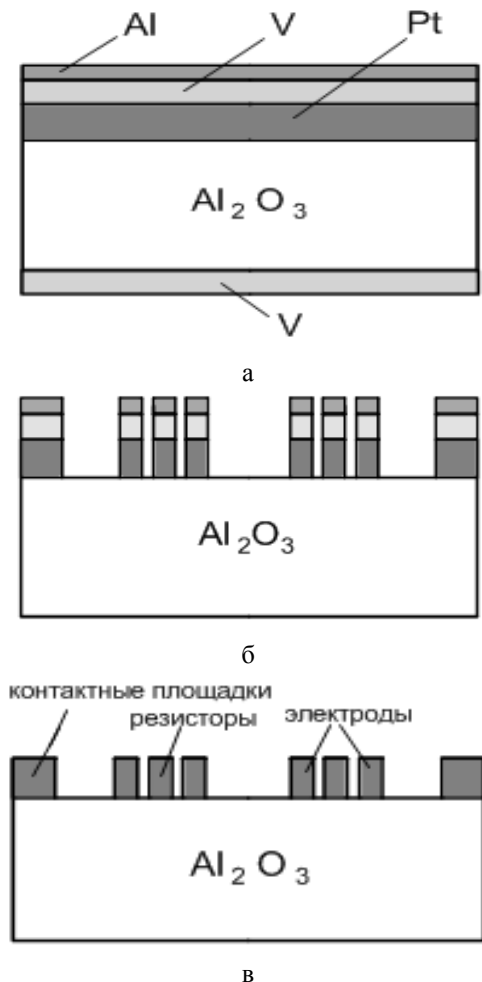


Рисунок 2 – Последовательность технологических операций, связанных с формированием нагревателя и электродов: а – осаждение металлических пленок платины, ванадия и алюминия на планарную сторону подложки и ванадия – на обратную; б – проведение фотолитографической операции и травление системы Al-V-Pt; в – удаление Al и V

При создании сквозных отверстий в диэлектрической подложке (второй блок технологических операций) использовалась разработанная в Минском НИИ радиоматериалов инновационная технология микромеханической обработки нанопористого анодного оксида алюминия. Данный блок включает осаждение двухслойной системы металлических пленок V–Al на планарную и обратную сторону подложки со сформированными нагревателем и электродами (рисунок 3а); нанесение на поверхность алюминия фоторезиста и формирование в нем и затем в маске топологии сквозных отверстий; жидкостное химическое травление  $Al_2O_3$  через маску V–Al и химическое удаление фоторезиста и маски (рисунок 3б).

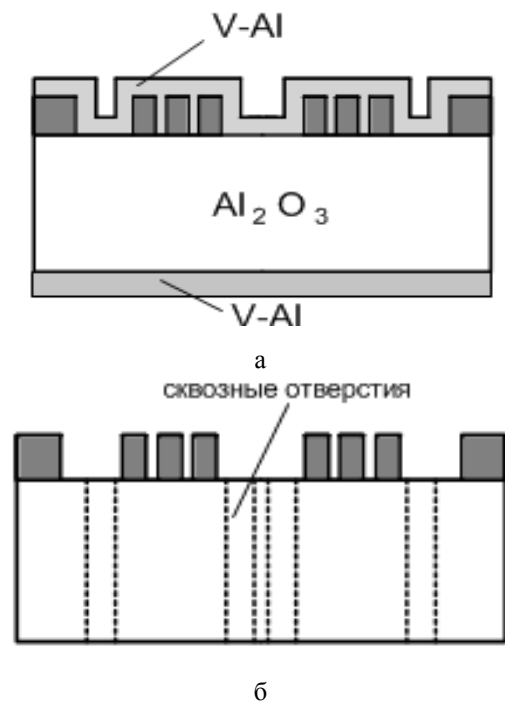


Рисунок 3 – Последовательность технологических операций, связанных с созданием сквозных отверстий в диэлектрической подложке в результате микромеханической обработки нанопористого анодного оксида алюминия: а – нанесение маски из V–Al на обе стороны подложки; б – жидкостное химическое травление маски и подложки

Третий блок технологических операций, включает нанесение полупроводникового чувствительного слоя различными методами и его термообработку для создания хорошего контакта к платиновым электродам и формирования необходимой структуры слоя. В результате проведения всех технологических операций поперечное

сечение микросистемы имеет вид, показанный на рисунке 4.

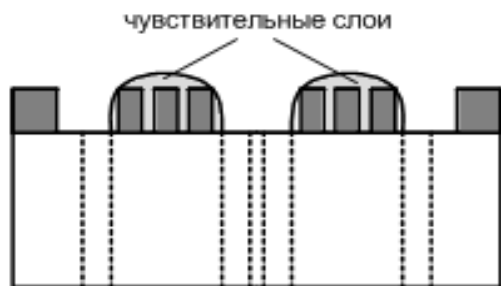


Рисунок 4 – Поперечное сечение микросистемы после нанесения чувствительного слоя и его термообработки

Изготовленные кристаллы микросистемы развариваются в 16-выводной металлический корпус для проведения в дальнейшем электрофизических измерений, которые будут выполнены на последующих этапах работы. На нынешнем же этапе с использованием ранее полученных результатов [3, 4] проведено моделирование основных свойств и параметров газовой микросистемы методом конечных элементов.

### Моделирование механических и тепловых свойств мультисенсорной системы

Работы, связанные с моделированием свойств, включали создание конечно-элементной модели микросистемы, определение температуры основных ее элементов и термомеханических деформаций, возникающих в конструкции при различных режимах работы микросистемы. Они основывались на зависимостях коэффициентов продольной и поперечной теплопроводности от пористости для оксида алюминия, полученные авторами работы ранее [3, 4].

Первоначально была построена структурированная призматическая сетка конечных элементов. Количество элементов составило 24000. Для разбиения подложки использовалось 3 слоя, а при разбиении металлизации – 2 слоя.

На рисунке 5 показано изменение (по данным моделирования) температуры чувствительного слоя газовых сенсоров в микросистеме с полосковым нагревателем в зависимости от приложенного напряжения. В качестве чувствительного слоя были выбраны слои на основе смеси оксидов индия и олова толщиной 25 мкм. Результаты моделирования показаны для подложки с пористостью 50 %, поскольку потребляемая мощность микросистемы в диа-

пазоне пористости подложки 0–50 % изменяется незначительно (рисунок 6). Таким образом, расчеты показывают, что при пористости подложки 10, 30, 50 и 70 % и напряжении питания 2 В можно обеспечить минимально приемлемый прогрев чувствительного слоя. При данных значениях пористости и напряжения питания температура чувствительного слоя составит 385, 391, 398 и 406 °С соответственно. Из рисунка 6 видно, что значительное снижение потребляемой мощности микросистемы (на 20 % и более) обеспечивает использование подложки с пористостью выше 50 %.

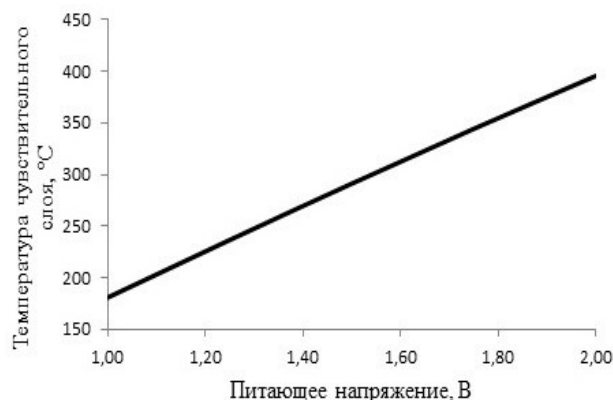


Рисунок 5 – Зависимость температуры чувствительного слоя от приложенного напряжения (результат моделирования)

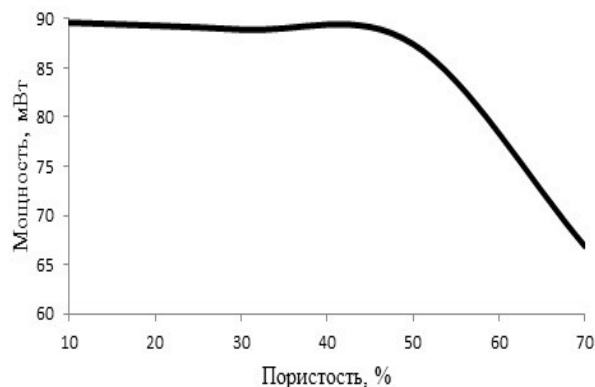


Рисунок 6 – Зависимость потребляемой мощности микросистемы от пористости алюмооксидной подложки (результат моделирования)

Расчеты также показывают, что термомеханические деформации, возникающие в конструкции микросистемы, являются допустимыми ( $\sim 5,9\text{--}6,0$ )  $\times 10^{-3}$ , но для их снижения следует увеличить размер площадок под чувствительный слой или уменьшить его толщину.

Использование другой топологии нагревателя в микросистеме – типа меандра – позволя-

ет увеличить температуру чувствительного слоя до 440 °С при напряжении питания в 2 В. Потребляемая мощность микросистемы также незначительно возрастает с 87,4 мВт для первой топологии нагревателя до 89,8 мВт – для второй, при этом форма нагревателя слабо влияет на зависимость потребляемой мощности от пористости.

### Заключение

Разработаны конструкция и технология создания 4-сенсорной газовой микросистемы, изготавливаемой на подложках из нанопористого анодного оксида алюминия. Конструкция микросистемы использует две топологии платинового нагревателя. В одном случае нагревателем служит полоска платины, во втором – нагреватель выполнен в виде меандра. Кристалл микросистемы, полученный на подложке нанопористого анодного оксида алюминия, имеет размер 3,7 × 3,7 мм и толщину 50 мкм. Для создания сквозных отверстий в диэлектрической подложке используется инновационная технология микромеханической обработки нанопористого анодного оксида алюминия.

На основании данных моделирования показана возможность нагрева чувствительного

слоя газового сенсора до 440 °С в зависимости от типа используемого нагревателя, а также рассчитан уровень термических деформаций, возникающих в конструкции микросистемы при ее нагреве и установлена зависимость изменения ее потребляемой мощности от величины пористости подложки.

Работа финансировалась в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Электроника и фотоника».

### Список использованных источников

1. Gas Sensor Micro Arrays [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.iam.kit.edu/wpt/english/274.php>
2. Stankova, M. Sensitivity and selectivity improvement of rf sputtered WO<sub>3</sub> microhotplate gas sensors / M. Stankova [et al.] // Sens. Actuators B, Chem. – 2006. –V. 113. – P. 241–248.
3. Белогуров, Е.А. Конструирование газовых микросистем на основе нанопористого анодного оксида алюминия / Е.А. Белогуров [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2011. № 2. – С. 59–65.
4. Баркалин, В.В. Конечно-элементное моделирование термомеханических свойств нанопористых материалов / В.В. Баркалин [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 1. – С. 18–24.

---

Reutskaya O.G., Belahurau Ya.A., Taratyn I.A., Khatko V.V.

### Four sensor gas microsystem based on porous anodic alumina substrate: design, fabrication technique, simulation

Design and fabrication technique of four sensor gas microsystem based on nanoporous anodic alumina have been developed. Simulation of basic elements' temperature and thermo-mechanical deformation created in the microsystem construction has been carried out by finite element method.

(E-mail: viacheslav.khatko@gmail.com)

**Key words:** nanoporous anodic alumina, four sensor gas microsystem, finite element method.

Поступила в редакцию 10.07.2013.