

УДК 681.586.712:621.3.049.77

ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

© 2018 г. И. В. Росляков¹, К. С. Напольский¹, В. С. Столяров², Е. Е. Карпов³,
А. В. Ивашев⁴, В. Н. Суртаев⁵

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Россия, Москва, 119991, Ленинские горы, 1, стр. 3

²Московский физико-технический институт,
Россия, Московская область, г. Долгопрудный, 141700, Институтский пер. 9
³ООО «Научно-технический центр измерительных газочувствительных датчиков»
Россия, Московская область, г. Люберцы, 140004, ул. Электрификации, 26а

⁴ООО «Фирма «Аэротест»»,
Россия, Московская область, пос. Томилино, 140072, ул. Жуковского, д. 5/1

⁵ПАО «Нефтяная компания «Роснефть»»,
Россия, Москва, 125284, ул. Беговая, 3
E-mail: ilya.roslyakov@gmail.com

Поступила в редакцию 21.09.2017 г.

В работе предложен и успешно реализован метод формирования планарных микронагревателей, позволяющих разогревать активную зону до температуры выше 500 °С. Разработанные нагревательные элементы характеризуются малой потребляемой мощностью, низкой инерционностью и чрезвычайно высокой устойчивостью к ударным нагрузкам. Используемые в работе синтетические подходы (анодное окисление, фотолитография, магнетронное напыление) отличаются технологичностью и простотой масштабирования. Это делает планарные нагревательные элементы перспективной платформой для создания на их основе полупроводниковых и термokatалитических сенсоров токсичных и взрывоопасных газов.

DOI:

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг токсичных (CO , NO_2 , H_2S , SO_2 и др.) и горючих (H_2 , CH_4 и прочие углеводороды) компонентов в атмосфере — чрезвычайно важная задача для обеспечения промышленной безопасности. Область применения газовых датчиков (сенсоров) чрезвычайно обширна и включает в себя предприятия нефтегазовой отрасли, химической промышленности, буровые установки, шахты, научно-исследовательские лаборатории, жилые помещения и т.д. На смену стационарным газоанализаторам с проводным подключением электропитания и выносных датчиков постепенно приходят сенсорные сети с беспроводной передачей информации. Данный подход обладает рядом неоспоримых преимуществ: 1) быстрота и легкость развертывания системы на новом объекте, 2) возможность добавления неограниченного количества точек контроля, 3) удобство монтажа выносных

датчиков в труднодоступных местах, 4) высокая отказоустойчивость системы в целом. Учитывая масштабы и скорость распространения беспроводного интернета становится очевидно, что повсеместное внедрение беспроводных сенсорных сетей уже не за горами.

Следует отметить, что независимо от типа используемой системы газового контроля и способа считывания показаний с датчиков, в их составе всегда есть чувствительный элемент (первичный преобразователь), преобразующий концентрацию определяемого компонента в воздухе в электрический сигнал.

На современном рынке сенсорных систем наибольшее распространение благодаря простоте конструкции, стабильности характеристик и низкой себестоимости получили датчики (чувствительные элементы) полупроводникового и термokatалити-

ческого типов, каждый из которых имеет свою нишу практического применения.

Контроль содержания горючих газов (например, метана, этана, пропана и водорода) в воздухе осуществляется для исключения возможности взрыва газовой смеси. При этом важно не допустить превышение нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР), который существенно выше, чем санитарные нормы для токсичных газов. Для метана, основного компонента природного газа, НКПР составляет 4.4 об.%. Для решения этой задачи наиболее часто применяются термокаталитические сенсоры, известные также как пеллисторы. Для анализа следовых (на уровне миллионных долей) количеств токсичных веществ в атмосфере наиболее рационально использование сенсоров полупроводникового типа.

Принцип действия полупроводниковых газовых сенсоров основан на изменении проводимости чувствительного слоя (как правило, это оксиды переходных металлов — SnO_2 , ZnO , In_2O_3 и др.) вследствие сорбции молекул газов на его поверхности [1]. Данным методом можно детектировать газы, обладающие как донорными свойствами (например, различные горючие газы, в том числе метан и пропан, летучие органические соединения, CO , NH_3 и др.), так и акцепторными (озон, оксиды азота, хлор, фтор и т.д.). Необходимо отметить, что для достижения малого (~ 1 с) времени отклика полупроводникового сенсора требуется разогрев его чувствительного элемента до достаточно высоких температур (от 250°C при детектировании этилового спирта и водорода до 500°C в случае метана).

Принцип действия термокаталитических датчиков основан на беспламенном окислении метана (или любого другого горючего газа) на поверхности каталитически активного элемента и измерении количества выделившейся при этом теплоты, которое при поддержании постоянства условий тепло-массообмена пропорционально концентрации метана в воздухе [2]. Данный принцип работы обеспечивает селективность термокаталитических сенсоров исключительно к горючим газам. Следует отметить, что реакция каталитического окисления горючего газа протекает с высокой скоростью лишь при повышенных температурах (в районе $400\text{--}500^\circ\text{C}$ при использовании Pt-Pd катализатора). Таким образом, наличие нагревательного элемента является необходимым условием для обоих типов сенсоров — полупроводниковых и термокаталитических. Недостатками коммерчески доступных пеллисторов являются высокое (более 100 мВт) энергопотребление и низкая устойчивость к ударным нагрузкам, что ограничивает их применение

в портативных устройствах анализа газовой атмосферы.

В последние годы активно ведутся исследования и разработки миниатюрных планарных чувствительных элементов для газовых сенсоров, обладающих чрезвычайно низким энергопотреблением и высокой механической прочностью [3]. Для их производства используются технологии, применяемые в микроэлектронике, что обеспечивает низкую себестоимость сенсоров и простоту реализации массового производства.

Среди основных требований, предъявляемых к материалу подложки для планарных чувствительных элементов газовых сенсоров, можно выделить термическую и механическую стабильность, вибро- и ударостойкость, малую теплопроводность, а также высокую адгезию чувствительного слоя и металлических контактов. На практике в качестве основы используют пластины оксида/нитрида кремния, поликор (Al_2O_3), а также пористые пленки анодного оксида алюминия. В качестве основных проблем устройств на основе кремния необходимо отметить низкую адгезию платинового нагревателя к материалу мембраны, низкую стабильность нитрида кремния при высоких температурах и высокую себестоимость производства.

Альтернативным решением может быть формирование планарных газовых сенсоров на пористых подложках анодного оксида алюминия [4, 5]. В отличие от кремниевых технологий они обладают рядом неоспоримых преимуществ [6]. В частности, следует отметить открытую пористую структуру с возможностью варьирования ее параметров в широких пределах, высокую термическую стабильность вплоть до 1000°C , высокую механическую прочность по сравнению с подложками из SiO_2 аналогичной толщины, возможность прецизионного контроля формы пористой подложки с микронным разрешением, хорошую адгезию металлических и каталитически активных слоев без нанесения промежуточных буферных материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящей работе предложена конструкция миниатюрного планарного нагревательного элемента для полупроводниковых и термокаталитических газовых сенсоров. Ниже приведено описание ключевых этапов его получения и методов анализа функциональных характеристик.

В качестве основы для создания микронагревателей использованы пленки анодного оксида алюминия. Формирование данного материала проводили путем анодирования алюминиевой фольги при постоянном напряжении. На поверхность полученной пористой оксидной пленки (диаметр пор

150 ± 10 нм, расстояние между соседними порами 260 ± 40 нм) с помощью фотолитографии и магнетронного напыления наносили массив планарных нагревательных элементов из платины в виде двумерной спирали (меандра) с латеральным размером $\sim 150 \times 150$ мкм² (рис. 1). На финальной стадии поверхность нагревателя покрывали защитным диэлектрическим слоем Al_2O_3 . Стоит отметить, что применение фотолитографического подхода к получению микронагревателей позволяет за один технологический цикл формировать сотни идентичных элементов, обеспечивая низкую себестоимость и высокую повторяемость продукции.

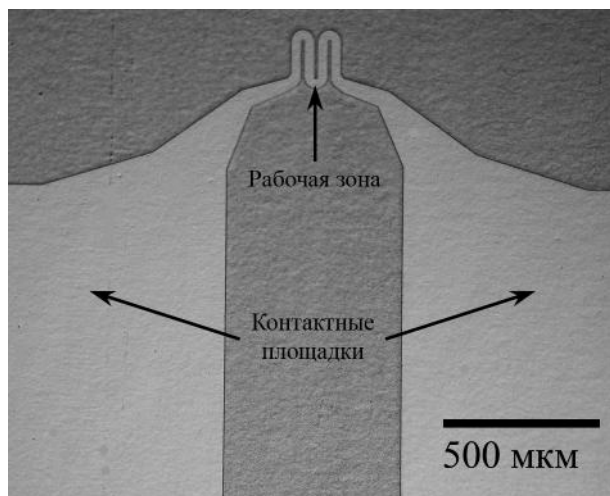


Рис. 1. Общий вид планарного нагревательного элемента. Показана рабочая зона в виде двумерной спирали и контактные площадки для монтажа в электрическую схему. Изображение получено методом оптической микроскопии.

Для аттестации электрофизических характеристик полученных элементов отдельные микронагреватели монтировали на токоподводящих колодках с помощью установки ультразвуковой клиновой микросварки Kulicke&Soffa 4526.

Важной характеристикой материала нагревателя является температурный коэффициент сопротивления (ТКС), знание которого необходимо для оценки температуры рабочей зоны сенсора исходя из электрофизических параметров. Следует отметить, что ТКС тонких пленок может существенно отличаться от соответствующей величины для объемного материала [7, 8], что приводит к большим ошибкам при использовании в расчетах справочных данных. В настоящей работе экспериментальное определение ТКС напыленной платины было реализовано следующим образом. Нагревательный элемент, смонтированный на токоподводящей колодке, помещали в сушильный шкаф Binder, температуру в котором ступенчато повышали от комнатной до 130°C . В ходе эксперимента измеряли

силу тока, протекающего через меандр при постоянной разности потенциалов 10 мВ. Следует отметить, что указанное значение напряжения питания мало и не приводит к разогреву меандра, поэтому его температура полностью определяется температурой окружающей среды.

Зависимость сопротивления R_T меандра и его температуры от приложенного напряжения определяли из данных циклической вольтамперометрии. Определение инерционности планарного нагревательного элемента проводили путем испытания устройств в ходе циклической смены режима работы. На нагреватель поочередно подавали напряжение, соответствующие температуре $\sim 100^\circ\text{C}$ (режим простоя) и $\sim 400^\circ\text{C}$ (режим работы). Длина импульса 1 секунда, скорость регистрации 1000 точек в секунду.

Регистрацию изображений поверхности нагревательного элемента в процессе работы проводили в затемненном помещении с помощью оптического микроскопа Nikon Eclipse 600pol.

Испытание удароустойчивости планарных элементов было реализовано путем периодического ударного воздействия по плате, на которой была смонтирована токоподводящая колодка с микронагревателем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурный коэффициент сопротивления

В общем виде температурная зависимость сопротивления описывается как:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad (1)$$

Здесь R_T и R_0 — значения электрического сопротивления при температурах T и T_0 , соответственно, α — температурный коэффициент сопротивления (ТКС), измеряемый в обратных Кельвинах. Для определения ТКС металлов T_0 обычно принимают равным 0°C , и следовательно R_0 является сопротивлением изучаемого проводника при данной температуре.

Сопротивление планарного нагревательного элемента увеличивается с повышением температуры из-за рассеяния электронов на фононах (тепловых колебаниях решетки). Для корректного выбора параметров работы устройства необходимо знать точное численное значение ТКС. Важно отметить, что величина α зависит от микроструктуры материала нагревателя и предистории его получения, поэтому использование табличного значения может привести к высокой погрешности.

В ходе экспериментов по определению ТКС температуру сушильного шкафа, в котором находи-

лись микронагреватели, ступенчато увеличивали, что приводило к ступенчатому изменению силы тока в цепи при постоянном напряжении питания. Типичный вид полученной зависимости $I(t)$ представлен на рис. 2, а. Далее на каждой ступени была определена величина электрического сопротивления меандра при текущей температуре. Полученная зависимость $R(T)$ хорошо описывается линейным уравнением (рис. 2б), что подтверждает постоянство ТКС как минимум в используемом температурном интервале. Этот факт позволяет определить как отношение углового коэффициента наклона к свободному члену:

$$\alpha = \frac{R_T - R_0}{R_0(T - T_0)} = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta T} = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\partial R}{\partial T} \quad (2)$$

Среднее по серии из 25 микронагревателей значение ТКС составило $34.3 \pm 0.7 \times 10^{-4}$ 1/К.

Согласно литературным данным [8], величина ТКС для благородных металлов и их сплавов является постоянной величиной вплоть до высоких температур, поэтому определенные вышеописанным способом значения корректно использовать для расчета температуры нагревательного элемента в широком интервале напряжений питания. Экспериментальное измерение ТКС во всем интересующем диапазоне температур (вплоть до 500–600 °С) трудно реализуемо в связи с ограниченной температурной устойчивостью материалов компонентов электрической схемы (корпус разъемов, изоляция проводов).

Параметры работы нагревательного элемента

Определение параметров работы планарного нагревательного элемента (напряжение питания, потребляемая мощность) реализовано на основе метода циклической вольтамперометрии. Зависимость

силы тока (I) от приложенного напряжения (U), регистрируемая в процессе линейной развертки напряжения питания со скоростью 50 мВ/с представлена на рис. 3, а. Отчетливо видно отклонение поведения вольтамперной характеристики (ВАХ) планарных нагревателей от линейного вида, типичного для классического резистора. Это является следствием роста сопротивления меандра из-за увеличения его температуры, которое в свою очередь обусловлено выделением тепла при протекании электрического тока через проводник согласно закону Джоуля-Ленца. Совпадение прямого и обратного хода кривых на рис. 3а свидетельствует об обратимости процесса и высокой скорости нагрева/охлаждения меандра. Инерционность нагрева при выбранной скорости развертки напряжения питания не наблюдается.

Используя зависимость $I(U)$ можно рассчитать сопротивление ($R = U/I$) нагревательного элемента и потребляемую им мощность ($N = U \cdot I$) при различных напряжениях питания. При этом сопротивление меандра толщиной 300 нм закономерно увеличивается от 11.6 до 31.4 Ом в процессе развертки напряжения до 1.5 В (рис. 3, б). Это происходит из-за увеличения рассеяния электронов на фонах вследствие роста температуры.

Используя значение ТКС, которое ранее было определено экспериментально, и исходя из измеренной зависимости $I(U)$, можно рассчитать температуру планарного нагревательного элемента в зависимости от прикладываемого напряжения питания. Для этого в выражение (1) следует подставить сопротивление меандра, найденное по закону Ома ($U = I \cdot R$):

$$T = \frac{\left(\frac{U}{I \cdot R_K} \right)}{\alpha} + T_K \quad (3)$$

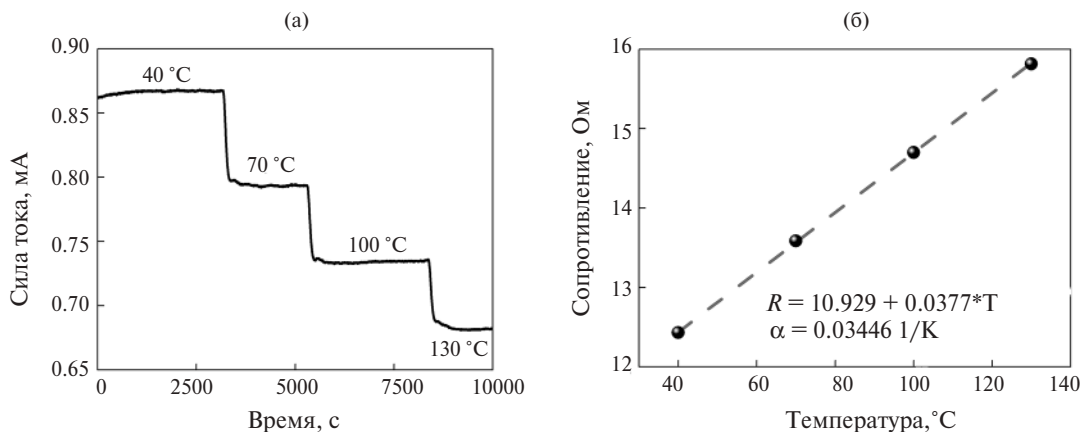


Рис. 2. Определение температурного коэффициента сопротивления (α). (а) Типичный вид зависимости тока от времени, регистрируемой в ходе эксперимента; (б) зависимость сопротивления планарного нагревательного элемента (R) от температуры (T).

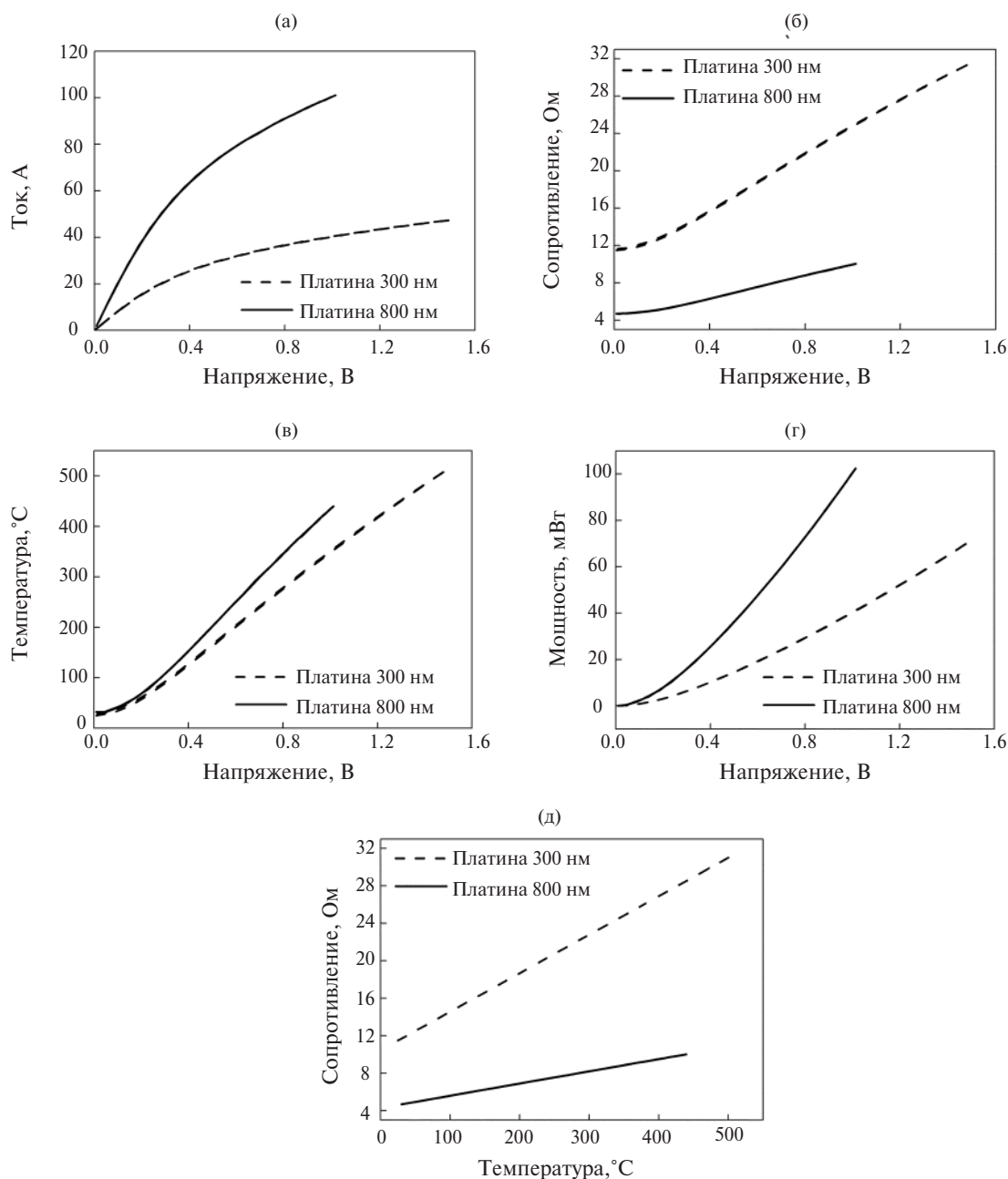


Рис. 3. Параметры работы планарного нагревательного элемента. Вольтамперная характеристика элементов различной толщины (а) и рассчитанные из нее зависимости сопротивления (б), температуры нагревателя (в) и потребляемой мощности (г) от напряжения питания. Зависимость сопротивления меандров от температуры (д).

Здесь R_K — сопротивление нагревателя при комнатной температуре T_K . Зависимость, полученная по уравнению (3) представлена на рис. 3в. Необходимо отметить, что таким образом можно рассчитать лишь среднюю температуру меандра в предположении, что токоподводы и контактные площадки вносят малый вклад в измеряемое сопротивление.

Потребляемая нагревателем мощность увеличивается с ростом напряжения питания (рис. 3, г).

Однако, ее величина при характерных напряжениях питания около 1.2 В для 300 нм толщины платины и 0.9 В для 800 нм серии (соответствует температуре ~ 400 °C) оказывается менее 52 и 90 мВт, соответственно. Данные значения потребляемой мощности заметно меньше, соответствующей величины для существующих объемных аналогов (лежит в интервале от 100 до 300 мВт для единичных нагревателей, используемых в сенсорах ДТК-1 (ООО «НТЦ ИГД», Россия), TGS6810 (Figaro

Engineering Inc., Япония), NAP-100AC (Nemoto&CoLtd., Япония) и 4p-50 CiTipel (City Technology Ltd., Великобритания)).

Важно отметить, что сопротивление меандра линейно увеличивается с температурой (рис. 3, д), что позволяет легко контролировать температуру рабочей зоны планарного нагревательного элемента путем измерения его горячего сопротивления.

Визуальное подтверждение разогрева рабочей зоны планарного нагревательного элемента можно наблюдать с помощью оптического микроскопа в затемненном помещении (рис. 4). Для серии образцов микронагревателей с толщиной Pt 800 нм первые признаки свечения видны при $U \approx 0.85$ В. По мере увеличения значения напряжения интенсивность свечения увеличивается. Температура, соответствующая красному калению меандра при 1.1 В, близка к 480 °С. Таким образом, данные вольтамперометрии и визуальные наблюдения за свечением рабочей зоны чувствительного элемента хорошо согласуются между собой.

Следует отметить, что дальнейшее увеличение напряжения питания нецелесообразно из-за больших энергетических потерь. В стационарном режиме подводимое благодаря электрическому нагреву тепло отводится благодаря теплопроводности, естественной конвекции и излучению. Конвекционная теплоотдача согласно закону Ньютона-Рихмана пропорциональна разности температур на границе двух сред. При появлении свечения мощность, отводимая от рабочей зоны чувствительного эле-

мента, резко увеличивается и становится пропорциональна разнице температур в четвертой степени ($T_{\Sigma}^4 - T_{\Gamma}^4$), где T_{Σ} и T_{Γ} — температура чувствительного элемента и температура окружающей его среды, соответственно [9].

Инерционность планарного нагревательного элемента

Для определения инерционности планарного нагревателя термокатализитического газового сенсора были проведены испытания образцов в режиме циклической смены режима работы (рис. 5). При скачкообразном увеличении напряжения (интервал от 2 до 3 секунд) ток резко возрастает, достигая величины около 70 мА для нагревателей с толщиной 300 нм и 160 мА — с толщиной 800 нм. Далее по мере разогревания меандра (увеличения сопротивления) ток уменьшается и выходит на плато, соответствующее стационарному режиму работы. Обратная ситуация наблюдается при уменьшении напряжения питания (интервал от 3 до 4 секунд) — ток также стабилизируется не сразу за счет постепенного остывания меандра.

Количественные характеристики инерционности, в частности время достижения стационарного режима, представлены в табл. 1. Критерием стационарности являлось достижение сопротивления нагревателя 90–99% от сопротивления в стационарном режиме. Отметим, что продолжительность процесса остывания гораздо больше чем время, затрачиваемое на нагрев.

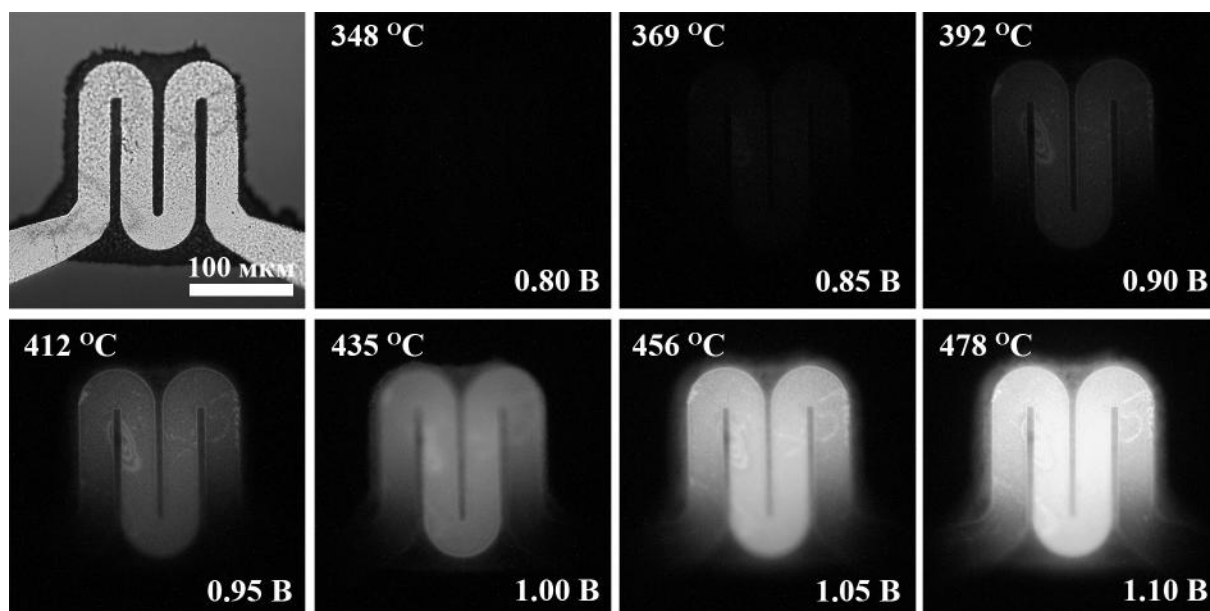


Рис. 4. Свечение планарного нагревательного элемента в темноте при различных напряжениях питания. Приведенные значения температуры рассчитаны из вольтамперной характеристики по формуле (3). В верхнем левом углу представлена фотография рабочей зоны чувствительного элемента на свету. Изображения получены методом оптической микроскопии.

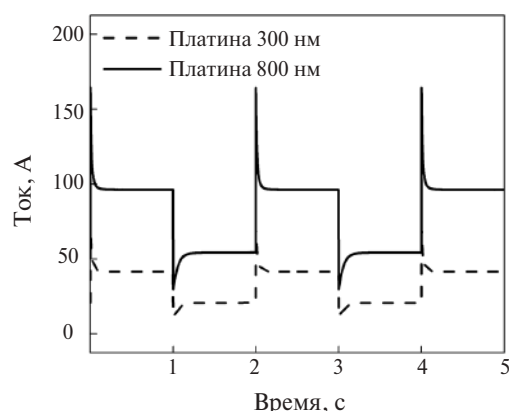


Рис. 5. Аттестация инерционности планарных нагревательных элементов толщиной 300 нм (пунктирная кривая) и 800 нм (сплошная кривая). Испытание проводили в циклическом режиме: рабочая температура $\sim 400^\circ\text{C}$; температура простоя $\sim 100^\circ\text{C}$. Длина импульса 1 секунда, скорость регистрации данных 1000 точек в секунду.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования планарного нагревательного элемента в динамическом режиме работы, что в дальнейшем позволит снизить среднюю потребляемую мощность устройства более чем на порядок.

Долговременная стабильность работы

Стабильность сопротивления нагревательного элемента, обеспечивающая постоянство температуры при фиксированном напряжении питания, является обязательным требованием при производстве газовых сенсоров. Долговременный дрейф сопротивления нагревателя измеряли при его работе при температуре $\sim 400^\circ\text{C}$. Для минимизации влияния колебаний температуры окружающей среды, испытания микронагревателей проводили в сушильном шкафу при 40°C . Зарегистрированные зависимости $I(t)$ при постоянном напряжении позволяют определить дрейф сопротивления планарных нагревательных элементов $\partial R/\partial t$. Проведенные

эксперименты свидетельствуют, что в процессе работы наблюдается незначительное увеличение сопротивления планарного нагревателя со скоростью 1.2% в месяц для элементов с толщиной платины 300 нм и менее 0.7% в месяц в случае 800 нм Pt мейандров. Таким образом, полученные тонкопленочные Pt микронагреватели на подложке из анодного оксида алюминия пригодны для их использования в течение более 1 года.

Устойчивость к ударным нагрузкам

Проведенные испытания планарных элементов на устойчивость к ударным нагрузкам показали их чрезвычайную стабильность. Все испытанные элементы сохранили работоспособность после 5000 ударов. Стоит отметить, что для пеллисторов, широко используемых в настоящее время для детектирования горючих газов в атмосфере, работоспособность после 1000 ударов считается очень хорошей характеристикой. В большинстве случаев объемные элементы существенно деградируют уже после 100 ударов.

Сравнение с мировыми аналогами

Создание газовых сенсоров на основе планарных чувствительных элементов является чрезвычайно перспективным направлением, предвещающим существенное уменьшение себестоимости продукции и улучшение ее функциональных характеристик. В связи с этим в последние годы многие компании, специализирующиеся на производстве газовых сенсоров, ведут активные разработки планарных элементов. Основные технические характеристики представленных в работе планарных нагревательных элементов различной толщины и их сопоставление с существующими мировыми аналогами приведены в табл. 2.

Отметим, что микронагреватель CCS4_15 производства CMOS Sensors обладает сравнимой мощностью и большей скоростью разогрева в сравнении с разработанными элементами из платины толщиной 300 нм. Это достигается малой толщиной мем-

Таблица 1. Численные показатели инерционности планарных нагревательных элементов толщиной 300 и 800 нм на подложке из анодного оксида алюминия толщиной 30 мкм. Времена выхода «на режим» (t_x) соответствуют времени достижения сопротивления нагревателя $X\%$ от сопротивления в стационарном режиме

Режим	Толщина Pt, нм	Напряжение питания, В	Мощность, мВт	Время выхода «на режим», мс		
				t_{90}	t_{95}	t_{99}
Охлаждение с 400 до 100°C	300	0.33	6.9	107 ± 1	148 ± 1	248 ± 3
	800	0.28	15.24	87 ± 1	126 ± 1	236 ± 2
Нагрев от 100 до 400°C	300	1.23	51.1	43 ± 1	63 ± 1	121 ± 2
	800	0.92	88.5	34 ± 1	51 ± 1	108 ± 1

Таблица 2. Сравнение характеристик представленных в работе планарных нагревательных элементов из платины различной толщины с существующими мировыми аналогами

	Настоящая работа		CMOS Sensors CCS4_15 [10]
	Pt 300 нм	Pt 800 нм	
Холодное сопротивление, Ом	12.8 ± 0.9	4.26 ± 0.19	41 ± 3
Напряжение питания при 400°C, В	1.23	0.92	~ 1.8
Температурный коэффициент сопротивления $\alpha \times 10^4$, 1/K	34.3 ± 0.7	27.8 ± 0.6	20.5
Мощность при 400°C, мВт	~ 51	~ 88	~ 52
Максимальная температура, °C	~ 500	~ 500	~ 600
Время нагрева t_{90} , мс	43 ± 1	34 ± 1	15 ± 5
Размер рабочей зоны, мкм	150×150	150×150	200×200
Геометрические размеры, мм	3.5×4.5	3.5×4.5	0.9×1.0

браны, используемой CMOS Sensors. В то же время, полученные в данной работе микронагреватели сформированы на пористой подложке толщиной 30 мкм, которая может выступать в качестве носителя для катализатора при изготовлении термокаталитических газовых сенсоров. Нанесение же носителя катализатора на микронагреватель CCS4_15 приведет к существенному увеличению массы рабочей зоны и, как следствие, к увеличению требуемой мощности и уменьшению быстродействия.

На рынке также существуют аналогичные по конструкции газовые сенсоры с напряжением питания ~ 3 В и потребляемой мощностью около 110 мВт при рабочей температуре 400–500 °C [11]. Стоит отметить, что альтернативные решения для определения концентрации летучих органических соединений [12] работают при температурах ~ 300 °C, что недостаточно для термокаталитического детектирования горючих газов (например, метана) и создания датчиков полупроводникового типа.

ВЫВОДЫ

В работе предложен и успешно реализован метод формирования планарных нагревательных элементов из платины на пористой подложке из анодного оксида алюминия. Полученные элементы позволяют разогревать рабочую зону до температуры 500°C, обладая при этом малой инерционностью и низким энергопотреблением. При работе в стационарном режиме при 400°C дрейф сопротивления платинового микронагревателя толщиной 800 нм не превосходит 0.7% в месяц, что достаточно для стабильной работы устройства в течение более 1 года.

Планарные микронагреватели на основе пористых пленок анодного оксида алюминия из-за рав-

номерного распределения массы по поверхности изделия демонстрируют чрезвычайно высокую стабильность к механическим нагрузкам, выдерживая более 5000 ударов без обрыва электрической цепи. Данная величина более чем на порядок выше механической стабильности пеллисторов. Устойчивость планарных элементов к ударным нагрузкам позволяет существенно продлить срок службы чувствительных элементов и сократить издержки по их замене в переносных газосигнализаторах.

Достигнутые характеристики планарных нагревательных элементов подтверждают перспективность их использования в качестве платформы для полупроводниковых и термокаталитических сенсоров токсичных и взрывоопасных газов. Используемые в работе синтетические подходы (анодное окисление, фотолитография, магнетронное напыление) отличаются технологичностью и простотой масштабирования, обеспечивая низкую себестоимость и высокую повторяемость продукции.

Работа выполнена в рамках целевого инновационного проекта ПАО «НК «Роснефть». Авторы выражают благодарность Е.М. Левченко за плодотворное обсуждение перспектив и путей коммерческого внедрения представленной разработки. Поведение пористых пленок анодного оксида алюминия при высоких температурах изучено при содействии Российского фонда фундаментальных исследований (грант №16-38-00861). В ходе исследований использовано оборудование Центра коллективного пользования МГУ имени М. В. Ломоносова «Технологии получения новых наноструктурированных материалов и их комплексное исследование».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krivetskiy V., Rumyantseva M., Gaskov A.* Design, synthesis and application of metal oxide-based sensing elements: a chemical principles approach. Metal oxide nanomaterials for chemical sensors. Ed. by Carpenter M.A., Mathur S., Kolmakov A. Springer, 2013. P. 69–115.
2. *Каттралл Р. В.* Химические сенсоры. М.: Научный мир, 2000. 144 с. / пер. с англ. Максименко О.О. под ред. Петрухина О.М. (Cattrall R.W. Chemical Sensors. Oxford: Oxford University Press, 1997.)
3. *Vasiliev A., Pisliakov A., Sokolov A., Samotaev N., Soloviev S., Oblov K., Guarnieri V., Lorenzelli L., Brunelli J., Maglione A., Lipilin A., Mozalev A., Legin A.* Non-silicon MEMS platforms for gas sensors. // Sensors and Actuators B: Chemical. 2016. V. 224. P. 700–713.
4. *Росляков И. В., Колесник И. В., Напольский К. С., Карелин А. П., Миронов С. М., Столяров В. С., Суртаев В. Н., Саяпин О. А.* Развитие сенсорных технологий и техники мониторинга взрывоопасности углеводородо-воздушных смесей // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2015. № 4. С. 85–89.
5. *Karpov E. E., Karpov E. F., Suchkov A., Mironov S., Baranov A., Sleptsov V., Calliaric L.* Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement. // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. V. 194. P. 176–180.
6. *Росляков И. В., Напольский К. С., Евдокимов П. В., Напольский Ф. С., Дунаев А. В., Елисеев А. А., Лукашин А. В., Третьяков Ю. Д.* Термические свойства мембрананодного оксида алюминия. // Наносистемы: физика, химия, математика. 2013. № 4. С. 120–129.
7. *Kim J., Kim J., Shin Y., Yoon Y.* A study on the fabrication of an RTD (resistance temperature detector) by using Pt thin film. // Korean Journal of Chemical Engineering. 2001. V. 18. P. 61–66.
8. *Lide D. R.* CRC Hand book of Chemistry and Physics, 84th ed. CRC Press, 2003. 2712 p.
9. *Карпов Е. Ф., Басовский Б. И.* Контроль проветривания и дегазации в угольных шахтах. М.: Недра, 2014. 335 с.
10. URL: <http://www.ccmoss.com/> (дата обращения: 09.06.2015).
11. URL: <http://www.sgxsensortech.com/products-services/industrial-safety/mems-pellistor/> (дата обращения: 29.08.2016).
12. URL: <http://ams.com/eng/Products/Environmental-Sensors/Gas-Sensors/AS-MLV-P2> (дата обращения: 29.08.2016).