

$\{1, 2, \dots, p-1\}$ . Тогда  $f^q \equiv g \pmod{p}$  для некоторого  $g \in \{1, 2, \dots, p-1\}$ . При этом  $g \in G$  и одновременно остаётся квадратичным невычетом. Отсюда следует, что  $g$  является примитивным элементом группы  $G$  (предположение о не примитивности сразу же приводит к заключению, что  $g$  – квадратичный вычет).

При  $p \equiv 1 \pmod{8}$  и  $2$  и  $-1$  являются квадратичными вычетами. Но с вероятностью  $1/2$  можно наудачу достаточно быстро найти в поле  $Z/pZ$  квадратичный невычет, то есть элемент  $f \in \{1, 2, \dots, p-1\}$ , удовлетворяющий соотношению  $f^{(p-1)/2} \equiv -1 \pmod{p}$ . После этого несложно найти образующую  $g$  подгруппы  $G$  по формуле:  $f^q \equiv g \pmod{p}$ .

Перед нами стоит задача нахождения квадратного корня из конкретного числа  $z \in \{1, 2, \dots, p-1\}$  в поле  $Z/pZ$  с нечётными простыми  $p \equiv 1 \pmod{8}$ . Конечно,  $\bar{z} \in Z/pZ^{*2}$ .

Иными словами,  $z^{(p-1)/2} = (z^q)^{2^{e-1}} \equiv 1 \pmod{p}$ .

Следовательно,  $(z^q) \pmod{p} = y$  принадлежит циклической группе  $G = \langle g \rangle$ , порождённой элементом  $g$ , и является квадратичным вычетом.

Поэтому  $y$  не является образующей группы  $G$ . Найдётся чётное число  $k$ ,  $0 \leq k \leq 2^e$ , такое, что

$\bar{g}^k = \bar{y}^{-1}$ . Тогда  $z^q \cdot g^k \equiv 1 \pmod{p}$ , а следовательно,  $z^{q+1} \cdot g^k \equiv z \pmod{p}$ . Очевидно,  $\bar{y}_1 = \bar{z}^{(q+1)/2} \cdot \bar{g}^{k/2}$  является квадратным корнем из  $\bar{z}$  в поле  $Z/pZ$ . Прямой переборный метод элементов  $Z/pZ$  и вычисления их квадратов до получения  $\bar{z}$  мы заменили двумя переборными процедурами – поиск квадратичного невычета  $f \in \{1, 2, \dots, p-1\}$  и поиск чётной степени  $k$  элемента  $\bar{g} = f^q$ , равной  $\bar{y}^{-1}$ . Эти процедуры предполагаются быть достаточно короткими.

#### Литература

1. Венбо Мао. Современная криптография. Теория и практика: пер. с англ. – Издательство М.: Вильямс, 2005 – 768 с.
2. Липницкий В.А. Современная прикладная алгебра. Математические основы защиты информации от помех и несанкционированного доступа. – Мн.: БГУИР, 2006. – 88 с.
3. Крупенкова Т.Г. Криптографические средства защиты информации: в 2 ч. – Электрон. дан. БНТУ, 2012. – Ч.1: учебно-методическое пособие.

УДК 681.2.082:621.3

### ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА НА ГАЗОВУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДВУХСЕНСОРНЫХ МИКРОСИСТЕМ

Реутская О.Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В современной газовой сенсорике особое внимание уделяется вопросам повышения газовой чувствительности, снижения энергопотребления, упрощения технологий изготовления, уменьшения стоимости изделий без изменения газочувствительных качеств датчиков и систем.

В данной работе проведено исследование газочувствительных свойств двухсенсорной газовой микросистемы, описанной в работе [1] в различных режимах работы.

Режим постоянного нагрева заключается в подключении сенсоров микросистемы к источникам постоянного питания в выбранном режиме.

Экспериментально было установлено, что при использовании постоянного нагрева на сенсорах микросистемы наблюдается «дрейф» значений сопротивлений. Например, при токе 51 мА и мощности 83,4 мВт при постоянном нагреве в течение 8 ч изменение сопротивления на одном из сенсоров составило 0,89 кОм.

Для того, чтобы физико-химические процессы протекали на поверхности чувствительного слоя достаточно быстро, обеспечивая быстроедействие на уровне нескольких секунд, сенсор периодически необходимо разогревать до температуры

450 – 500°C [2]. В результате характеристики сенсора способны восстанавливаться до исходного состояния. В период отжига происходит активное освобождение поверхностных слоев полупроводника от сорбированных «отравляющих» газовых компонент [3].

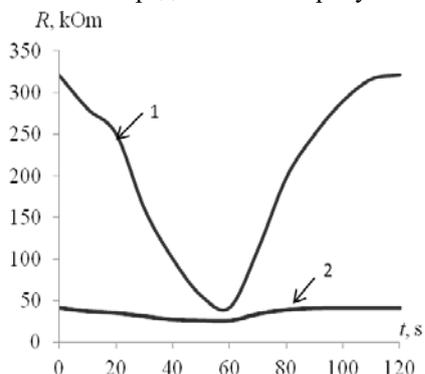
Целью данной работы являлось исследование эффективности режима импульсного нагрева для мультисенсорной микросистемы, состоящей из двух сенсоров на подложке из наноструктурированного оксида алюминия, по сравнению с режимом постоянного нагрева. Важной особенностью является сохранение параметров микросистемы в результате воздействия серии импульсных нагревов на конструкцию и газочувствительные слои, и обеспечение ее работоспособность на протяжении длительного периода времени.

В качестве чувствительных слоев были выбраны  $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$  для первого сенсора микросистемы, и  $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$  – для второго. При формировании газочувствительных слоев применялась методика капельного послойного нанесения выбранных составов с промежуточными кратковременными отжигами. Подготовка к измерению газовой

чувствительности к воздействию газов CO и NO<sub>2</sub> включала отжиг сенсоров микросистемы при мощности 60 мВт в течении 320 ч. При проведении измерений сенсорного отклика было установлено взаимное влияние мощностей сенсоров микросистемы друг на друга. Учитывая данный факт, можно уменьшать мощность сенсоров при подборе режимов отжигов микросистемы в целом.

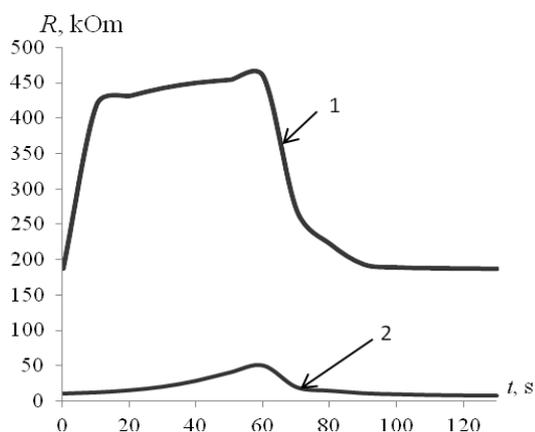
Измерения сенсорного отклика в режиме импульсного нагрева проводились следующим образом. Устанавливалась мощность на каждом сенсоре микросистемы 1,3 мВт, затем проводился кратковременный отжиг в течении 5 с при мощности 61 мВт, через 15 мин осуществлялась подача детектируемых газов CO или NO<sub>2</sub> с концентрацией 200 ppm и 4 ppm, соответственно, и фиксировались значения сопротивлений для каждого из сенсоров.

Результаты измерений сопротивления при воздействии CO представлены на рисунке 1.



- 1 – чувствительный слой SnO<sub>2</sub>+Pt+Pd;  
2 – чувствительный слой In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Pt

Рисунок 1 - Зависимость сопротивления микросистемы от времени при воздействии CO с концентрацией 200 ppm



- 1 – чувствительный слой SnO<sub>2</sub>+Pt+Pd;  
2 – чувствительный слой In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Pt

Рисунок 2 - Зависимость сопротивления микросистемы от времени при воздействии NO<sub>2</sub> с концентрацией 4 ppm

Газочувствительный слой на основе оксида олова показал более высокие результаты чувствительности к воздействию CO, чем на основе оксидов алюминия и индия.

На рисунке 2 представлены зависимости сопротивления микросистемы от времени при воздействии NO<sub>2</sub> с концентрацией 4 ppm при измерении в режиме импульсного нагрева.

Результаты измерения сопротивления микросистемы при воздействии NO<sub>2</sub> с концентрацией 4 ppm показали высокую чувствительность выбранных слоев к газу. Что позволяет производить измерения, в том числе и для концентраций NO<sub>2</sub> более низких значений (1-2 ppm).

Режим импульсного нагрева позволил снизить время релаксации микросистемы до 45 с. В режиме постоянного нагрева это время составило около 5 мин.

Методика измерения сенсорного отклика микросистемы в режиме импульсного нагрева, обеспечивает возможность проводить кратковременный «отжиг» сенсора перед началом измерений концентраций газов при малых мощностях нагрева. Такой способ измерения позволяет получить более высокий сенсорный отклик и снизить потребляемую мощность системы в целом, по сравнению с режимом постоянного нагрева.

При длительных испытаниях микросистем кратковременные отжиги не показали нарушения долговременности использования сенсоров, что свидетельствует об их оптимальности при работе с газовыми полупроводниковыми сенсорами и системами. При подборе режима импульсного нагрева можно получить потребляемую мощность микросистемы, не превышающую 10 мВт, сохраняя при этом ее газочувствительные характеристики.

В результате проведенных исследований было установлено, что отношение значений сенсорного отклика в режимах импульсного и постоянного нагревов микросистемы увеличилась для сенсора с чувствительным слоем SnO<sub>2</sub>+Pt+Pd в 1,7 и 1,5 раза, а с чувствительным слоем In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Pt – в 1,5 и 3,8 раза при воздействии CO и NO<sub>2</sub>, соответственно. При измерении сигнала сенсора в течении 60 с при импульсном нагреве, сенсорный отклик для сенсора SnO<sub>2</sub>+Pt+Pd составил ~ 670 % для определения CO с концентрацией 200 ppm, а сенсора In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Pt ~ 380 % при воздействии NO<sub>2</sub> с концентрацией 4 ppm. При этом средняя потребляемая мощность микросистемы не превышает 25 мВт.

Полученные в результате эксперимента данные подтвердили высокую работоспособности двухсенсорной микросистемы и возможность снижения энергопотребления полупроводниковых сенсоров и сенсорных микросистем до десятка милливатт.

Литература

1. Реутская, О.Г. Разработка 2-х сенсорной газовой микросистемы на подложках из пористого анодного оксида алюминия / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, В.В. Хатько // Приборостроение-2014: Материалы 7-й Международной научно-технической конференции, Минск, 19-21 ноября 2014 г. – Минск, 2014. – С. 362-364.

2. Morrison S.R. Selectivity in semiconductor gas sensors / S.R. Morrison // Sensor & Actuator. – 1997. – № 12. – P.425 – 440.

3. Румянцева, М.Н. Влияние микроструктуры полупроводниковых сенсорных материалов на хемосорбцию кислорода на их поверхности / М.Н. Румянцева Е. А. Макеева, А.М. Гаськов // журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева, 2008. – Т. LII, № 2. – С. 122–129.

УДК 544.22+544.08

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ (Ag, Pd) НА ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОКСИДА ВОЛЬФРАМА  $WO_3$  И КОМПОЗИЦИИ  $WO_3-Co_3O_4$**

**Савицкий А.А.<sup>1</sup>, Гайдук Ю.С.<sup>1</sup>, Реутская О.Г.<sup>2</sup>, Ломоносов В.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

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

Композиции оксида вольфрама  $WO_3-Co_3O_4$ ,  $WO_3-In_2O_3$ ,  $WO_3-MUNT$  (многостенные углеродные нанотрубки), полученные золь-гель методом, зарекомендовали себя в качестве перспективных материалов для создания чувствительных мало-мощных полупроводниковых газовых сенсоров, способных, в зависимости от режима работы, к избирательному детектированию газов различной природы ( $NO_2$ ,  $CO$  и др.) [1, 2].

В данной работе исследовалось влияние добавок благородных металлов (Pd, Ag) на газочувствительные свойства оксида вольфрама ( $WO_3$ ) и композиции  $WO_3-Co_3O_4$ , содержащей 5 % мас.  $Co_3O_4$ .

**Методика эксперимента.** Оксид вольфрама и оксид кобальта получали из 1,23 М водного раствора вольфрамата натрия  $Na_2WO_3 \cdot 2H_2O$  путем капельного вливания в 12 М раствор азотной кислоты. Оксид кобальта  $Co_3O_4$  получали из 2,3 М водных растворов сульфата кобальта  $CoSO_4 \cdot 7H_2O$  путем добавления 9,24 М водного раствора аммиака и последующего удаления электролитов.

Добавки Pd и Ag вводились путём прибавления к соответствующим золям гидроксидов вольфрама и кобальта водных растворов  $PdCl_2$  или  $AgNO_3$ , из расчета 1,5 % мас. (в пересчете на металл) от сухого остатка оксида (220°C, 1 ч).

Электрическое сопротивление образцов (таблеток) оксида вольфрама и композиции оксида вольфрама с  $Co_3O_4$  и добавками 1,5 % Ag и Pd в интервале 100–250 °C измеряли двухзондовым методом в корундовой ячейке, помещенной в трубчатую печь, подключенную к терморегулятору. Образцы в виде таблеток (диаметр 10 мм, толщина 3,5 мм, масса 0,7 – 0,8 г) прессовались из предварительно отожженных на воздухе порошков оксидов (400 °C, 2 ч) с применением органического связующего (канифоль) на гидравлическом прессе (давление 150 кПа) и спекались на воздухе при 600 °C (2 ч). Для улучшения контакта на обе стороны образца наносилась серебряная паста.

Электрическое сопротивление в режиме нагрева и охлаждения измеряли при помощи цифрового ампервольтметра В7–40, температура контролировалась при помощи хромель-алюмелевой термопары, закрепленной непосредственно вблизи образца.

Газочувствительный отклик (S, %) определяли по формуле  $S = (R_g - R_a) / R_a \cdot 100 \%$ , для газовой смеси, содержащей диоксид азота, и по формуле  $S = (R_a - R_g) / R_g \cdot 100 \%$ , для газовой смеси, содержащей оксид углерода ( $CO$ ), где  $R_a$  и  $R_g$  – сопротивление слоя на воздухе и при воздействии газовой смеси, соответственно. Газовоздушная смесь пропусклась через термостатированную измерительную ячейку в течение 10 минут со скоростью 2 л/ч, затем с той же скоростью подавался поток воздуха.

Выбранная температура отжига образцов соответствует температуре разложения солей серебра и палладия до свободных металлов.

**Обсуждение результатов.** На рисунках 1, 2 представлены зависимости чувствительности к диоксиду азота образцов  $WO_3$  и композиций  $WO_3-Ag(1,5 \text{ \% мас.})$ ,  $WO_3-Co_3O_4(5 \text{ \% мас.})-Ag(1,5 \text{ \% мас.})$ . Видно, что влияние обеих добавок заключается как в увеличении сенсорного отклика к газовой смеси, содержащей диоксид азота (3,4 ppm  $NO_2$ ), так и в увеличении скорости адсорбции газа.

На рисунке 3 представлен график зависимости сенсорного отклика композиции  $WO_3-Ag(1,5 \text{ \% мас.})$  при воздействии газовой смеси, содержащей 3000 ppm  $CO$  в азоте. Максимальная чувствительность (291 %) выше соответствующего значения для оксида вольфрама (60 %) в 4,85 раза.

Газовая чувствительность оксида вольфрама и исследованных композиций на его основе к оксиду углерода начинается выше 170 °C и максимальна при 240–250 °C.