

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.382

Е.Ю. СЕВАСТЬЯНОВ¹, Н.К. МАКСИМОВА¹, А.И. ПОТЕКАЕВ^{1,2}, Л.С. ХЛУДКОВА¹, Е.В. ЧЕРНИКОВ¹, Т.А. ДАВЫДОВА¹**ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРОВ АЦЕТОНА НА ОСНОВЕ ТОНКИХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК SnO₂ ***

Представлены результаты исследования электрических и газочувствительных характеристик сенсоров ацетона на основе тонких нанокристаллических пленок SnO₂ с различными нанесенными на поверхность (Pt/Pd, Au) и введенными в объем (Au, Ni, Co) катализаторами. Пленки, содержащие примеси золота и 3d-металлов, получали методом магнетронного распыления мозаичных мишеней. Особое внимание было уделено влиянию долговременных испытаний и уровня влажности на свойства сенсоров. Показано, что повышенной стабильностью в процессе испытаний при длительном воздействии ацетона, а также в условиях меняющейся влажности отличаются сенсоры с нанесенными на поверхность дисперсными слоями золота с введенными в объем добавками Au+Ni и в особенности Au+Co.

Ключевые слова: сенсоры, диоксид олова, катализаторы, добавки, золото, никель, кобальт, ацетон, стабильность.

Введение

В последнее время все больший интерес вызывают методы анализа выдыхаемого человеком воздуха. Установлено, что некоторые выдыхаемые газы могут служить биомаркерами заболеваний [1–4]. Например, контроль содержания ацетона в выдыхаемом воздухе позволит осуществлять неинвазивную диагностику дефицита инсулина. Для детектирования малых концентраций ацетона необходимо создание высокочувствительных сенсоров, селективных по отношению к другим содержащимся в смеси газам. Перспективным материалом для создания таких сенсоров являются тонкие пленки металлооксидных полупроводников. Однако исследования в этом направлении только начинаются, опубликованы первые данные о возможности создания ацетономеров на основе полученных с использованием толстопленочной технологии сенсоров [5, 6].

Ранее авторами в [7] было установлено, что максимально возможные значения отклика при воздействии ацетона наблюдаются для тонких нанокристаллических пленок диоксида олова, легированных примесью сурьмы, с нанесенными на поверхность дисперсными слоями палладия и платины Pt/Pd/SnO₂:Sb. Предварительные исследования показали, что особенностью сенсоров на основе этих пленок является нестабильность их параметров при длительной эксплуатации: в процессе испытаний происходит снижение значений отклика и рост времени отклика. В случае пленок, модифицированных золотом Au/SnO₂:Sb, Au, отклики на ацетон значительно ниже, при этом их свойства менее чувствительны к влажности и длительности испытаний.

В ряде работ [8–13] опубликованы данные, согласно которым при введении добавок оксидов переходных 3d-металлов (Cu, Ni, Co) в объем пленок диоксида олова, изготовленных с использованием толстопленочной технологии, наблюдается рост сопротивления сенсоров и отклика на водород и ряд других газов. Высказано предположение, что добавки способствуют росту плотности хемосорбированного кислорода на поверхности SnO₂. Авторы [14] высокую чувствительность к ацетону наблюдали в сенсорах на основе толстых пленок диоксида олова с добавками оксида никеля и золота SnO₂-NiO-Au. Согласно полученным данным, добавки Au+Ni и Au+Co в тонких пленках Au/SnO₂:Sb, Au, Ni (Co) также способствуют повышению значений отклика на следовые концентрации ацетона [7, 15] и водорода [16]. Использование высоких (700 К) рабочих температур обеспечивает селективность сенсоров ацетона по отношению к этанолу. Вместе с тем механизмы влияния 3d-металлов остаются дискуссионными, процессы деградации свойств пленок при длительных испытаниях практически не исследованы.

* Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России (задание № 3.9661.2017/8.9).

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния различных катализаторов, нанесенных на поверхность (Pt/Pd, Au) и введенных в объем (Au, Ni, Co) тонких нанокристаллических пленок SnO₂, полученных методом магнетронного напыления, на стабильность параметров сенсоров ацетона в процессе длительных испытаний и в условиях меняющейся влажности.

Методика эксперимента

Плёнки SnO₂, легированные примесью сурьмы, получали в магнетроне А-500 (Edwards) распылением на постоянном токе в кислородно-аргонной плазме мишени, которая представляет собой сплав Sn+0.5 ат. % Sb. В качестве подложки использовали пластины сапфира толщиной 150 мкм. Детальное описание технологии напыления пленок и изготовления сенсоров, собранных в корпуса ТО-8, приведено в работах [7, 15, 16]. Здесь отметим, что для введения в объем пленок золота, никеля и кобальта кусочки данных металлов помещали на поверхность мишени. Содержание добавок контролировали по соотношению площадей кусочков металлов S_m и распыляемой части мишени S_{Sn} . Изучали сенсоры из пяти серий – (1) – (5). Образцы Pt/Pd/SnO₂:Sb из серии (1) получали последовательным напылением дисперсных слоев Pd и затем Pt на поверхность пленок, легированных Sb. Серия (2) соответствует пленкам Au/SnO₂:Sb, Au, модифицированным только золотом на поверхности и в объеме, при $S_{Au}/S_{Sn} = 3 \cdot 10^{-3}$. Для исследуемых образцов Au/SnO₂:Sb, Au, Ni из серии (3) с напыленным на поверхность дисперсным слоем золота и добавками золота и никеля в объеме $S_{Au}/S_{Sn} = S_{Ni}/S_{Sn} = 3 \cdot 10^{-3}$. В случае пленок Au/SnO₂:Sb, Au, Co использовали различные содержания добавок: $S_{Au}/S_{Sn} = S_{Co}/S_{Sn} = 3 \cdot 10^{-3}$ (серия (4)) и $S_{Au}/S_{Sn} = 6 \cdot 10^{-3}$, $S_{Co}/S_{Sn} = 9 \cdot 10^{-3}$ (серия (5)).

Толщину и микроструктуру пленок контролировали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Для измерений характеристик при воздействии ацетона в диапазоне концентраций 1–20 ppm четыре сенсора одновременно помещали в кварцевую камеру объемом 1 л, методика эксперимента аналогична приведенной в работах [7, 15]. Прокачка камеры осуществлялась с использованием двух потоков воздуха: осушенного цеолитом и увлажненного барботером, что позволяло регулировать влажность поступающего в камеру воздуха. Относительная влажность RH определялась с помощью размещенного в камере емкостного датчика НН-4000. Необходимый объем паров ацетона подавали в камеру шприцом-дозатором «Hamilton». Измеряли временные зависимости проводимости (сопротивления) $G_0(R_0)$ сенсоров в чистом воздухе, а также $G_1(R_1)$ при воздействии ацетона с помощью специально разработанного стенда, который позволяет легко перестраивать и стабилизировать рабочую температуру образца, измерять относительную влажность в камере, обеспечивать работу сенсоров в режимах постоянного нагрева и термоциклирования. За адсорбционный отклик принимали отношение $G_1(T)/G_0(T)$, за время отклика t_r – время установления $0.9 G_{ст}$, где $G_{ст}$ – стационарное значение проводимости. Исследовали свойства сенсоров в режиме постоянного нагрева в зависимости от рабочей температуры, концентрации ацетона и уровня влажности. Для изучения стабильности параметров при длительной (30–360 сут) эксплуатации сенсоров проводились измерения значений отклика на воздействие паров ацетона через каждые 2–4 и более 30–60 сут.

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что толщины пленок варьировались в диапазоне 105–120 нм (табл. 1), при этом режимы напыления поддерживались постоянными. Микроструктура пленок диоксида олова из разных серий различается незначительно. Все пленки содержат мелкие нанокристаллиты размерами $d_1 = 8–15$ нм (серии (1), (2), (5)), 35–50 нм (серии (3) и (4)) (табл. 1). Эти кристаллиты частично объединены в агломераты. Размеры агломератов $d_2 = 70–100$ нм для пленок из серии (1), легированных только примесью сурьмы. В образцах из всех других серий образуются более крупные агломераты с размерами $d_2 = 140–280$ нм. По-видимому, повышенные размеры агломератов определяются прежде всего добавкой золота.

Характеристики пленок из разных серий существенно различаются (табл. 1). Самые низкие значения сопротивления в чистом воздухе при температуре 300 К характерны для свежеприготовленных пленок из серии (2), модифицированных только золотом. Введение в объем пленок диоксида олова добавок никеля и кобальта способствует повышению R_0 сенсоров из серий (3) – (5). Эти результаты согласуются с данными работ [8–13, 15, 16]. Отклики сенсоров, модифицированных золотом (2) и с низким содержанием добавки Co (4), монотонно увеличиваются до 720 К.

Температурные зависимости отклика на воздействие ацетона для других изученных образцов имеют вид кривых с максимумом при T_{\max} (рис. 1, табл. 1), причем $T_{\max} = 620\text{--}640\text{ К}$ для образцов из серии (5) с максимальными в условиях данного эксперимента $S_{\text{Au}}/S_{\text{Sn}} = 6 \cdot 10^{-3}$, $S_{\text{Co}}/S_{\text{Sn}} = 9 \cdot 10^{-3}$. Поскольку для создания портативных ацетономеров требуется по возможности низкая потребляемая мощность, в дальнейшем характеристики измеряли при рабочей температуре $T = 670\text{ К}$, обеспечивающей достаточно высокие значения отклика, время отклика не превышает 3 с. G_1/G_0 меняются в диапазоне 7–12 на 8 ppm ацетона для всех сенсоров, за исключением образцов из серии (2) на основе пленок диоксида олова, модифицированных только золотом, для которых имеют место пониженные $G_1/G_0 = 2\text{--}3$. Очевидно, что введение добавок Ni и Co в объем пленок способствует повышению отклика на ацетон. Ранее [7] было показано, что концентрационные зависимости отклика для свежеприготовленных образцов из всех серий сублинейны. По-видимому, при воздействии ацетона преобладающую роль играет канальная составляющая проводимости пленок диоксида олова, состоящих из микрокристаллов, соединенных мостиками проводимости того же состава [17, 18].

Таблица 1

Толщины пленок диоксида олова с различными катализаторами, размеры микрокристаллов d_1 и агломератов d_2 , а также основные параметры свежеприготовленных сенсоров ацетона. Значения отклика G_1/G_0 и времени отклика t_r измерены при концентрации ацетона $n = 8\text{ ppm}$ при рабочей температуре 670 К

Тип сенсора	Pt/Pd/SnO ₂ : Sb серия (1)	Au/SnO ₂ : Sb,Au серия (2)	Au/SnO ₂ :Sb,Au,N серия (3)	Au/SnO ₂ :Sb,Au,Co серия (4)	Au/SnO ₂ :Sb,Au,Co серия (5)
Толщина, нм	105	110	110	115	120
d_1 , нм	18–20	8–13	13–60	30–50	8–16
d_2 , нм	70–100	146–210	250–280	140–250	190–260
T_{\max} , К	670–690	670–700	700	>730	620–640
R_0 , МОм	1.5–10	0.23–0.3	22–30	1–10	3–20
G_1/G_0	9–12	2–3	7–9	7–11	8–10
t_r , с	3	3	3	3	3

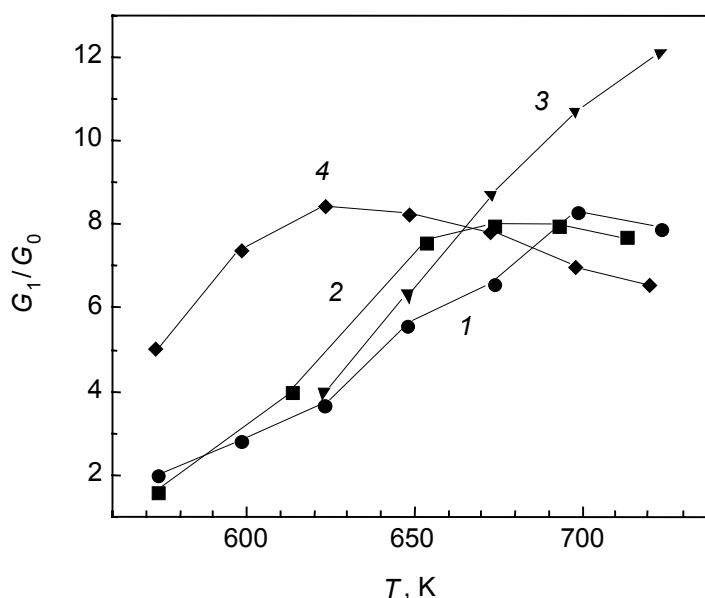


Рис. 1. Зависимость от рабочей температуры отклика на 8 ppm ацетона свежеприготовленных сенсоров из серий: кр. 1 – (2), кр. 2 – (3), кр. 3 – (4), кр. 4 – (5)

Рассмотрим далее особенности характеристик различных сенсоров, подвергнутых длительным испытаниям. Сопротивление в чистом воздухе R_0 сенсоров из серий (1) и (2) практически не изменяется, а в случае сенсоров из серий (3) – (5) с добавками Ni и Co заметно снижается (табл. 2).

Таблица 2

Длительности испытаний и основные параметры сенсоров ацетона из различных серий после завершения испытаний. Значения отклика G_1/G_0 и времени отклика t_r измерены при концентрации ацетона $n = 8$ ppm при рабочей температуре 670 К

Серия сенсора	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Длительность испытаний t , сут	30	200	30	30	360
T_{max} , К	>720	>720	>720	>720	670–700
R_0 , МОм	1.5–2.1	0.23–0.3	8–10	14–18	15–20
G_1/G_0	1.5–2.3	1.8–1.9	3.5–3.8	4–4.5	5.7–6.2
t_r , с	12–15	12–15	18–22	18–22	12–14

Для всех образцов наблюдается рост температуры T_{max} , при которой имеют место максимальные отклики (рис. 2, табл. 2), снижаются значения отклика, измеренные при 670 К, растут времена отклика (табл. 2). Концентрационные зависимости отклика остаются сублинейными (рис. 3). На рис. 4 представлены зависимости G_1/G_0 от длительности испытаний. Можно видеть, что наиболее существенно отклики снижаются в течение первых 7–15 сут, причем практически не меняются параметры сенсоров из серии (2), отличающихся минимальной чувствительностью. Наиболее заметно (до $G_1/G_0 = 1.5–2.3$) снижаются отклики для образцов из серии (1) с нанесенными на поверхность каталитическими слоями Pt/Pd. Повышенной стабильностью характеризуются сенсоры из серии (5), для которых после испытаний в течение 360 сут наблюдаются высокие значения $G_1/G_0 = 5.7–6.2$ (рис. 4, табл. 2).

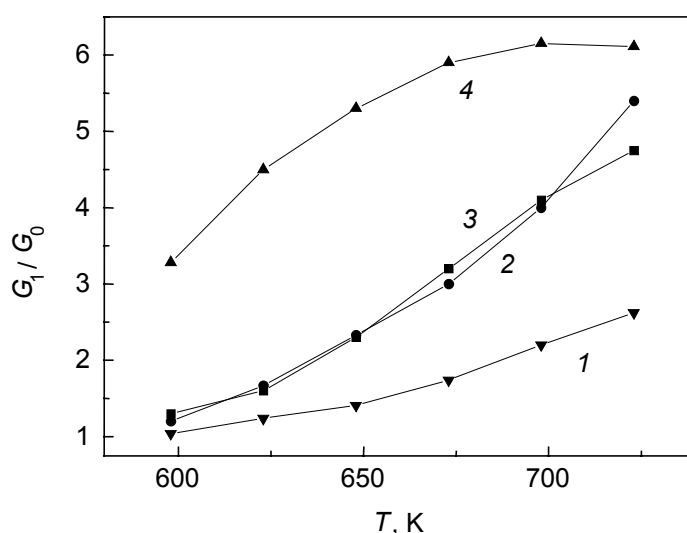


Рис. 2. Зависимости от рабочей температуры отклика на 8 ppm ацетона, измеренные при рабочей температуре 670 К, после завершения испытаний сенсоров из серий: кр. 1 – (2), кр. 2 – (3), кр. 3 – (4), кр. 4 – (5)

Одним из существенных источников нестабильности параметров сенсоров на основе металлооксидных полупроводников является изменение влажности окружающей среды [17]. В работе [7] было показано, что для свежеприготовленных пленок, модифицированных золотом, из серии (2) и с добавкой никеля из серии (3) отклики на воздействие ацетона наиболее заметно снижаются в области низких значений относительной влажности $RH < 30\%$, при дальнейшем увеличении RH до 100 % G_1/G_0 меняются незначительно. Аналогичный характер имеют представленные на рис. 5

данные для сенсоров из серий (2) и (5), прошедших наиболее длительные испытания. При измерениях в условиях высокой влажности, представляющих интерес при использовании сенсоров для анализа, выдыхаемого человеком воздуха, для которого $RH \sim 90\%$, отклик сенсоров на ацетон практически не зависит от влажности. В диапазоне 30–90 % образцы из серии (5) с максимальным содержанием золота и кобальта после испытаний в течение 368 сут отличаются высокими значениями $G_1/G_0 = 5.3\text{--}5$ и могут быть успешно использованы для создания ацетономеров.

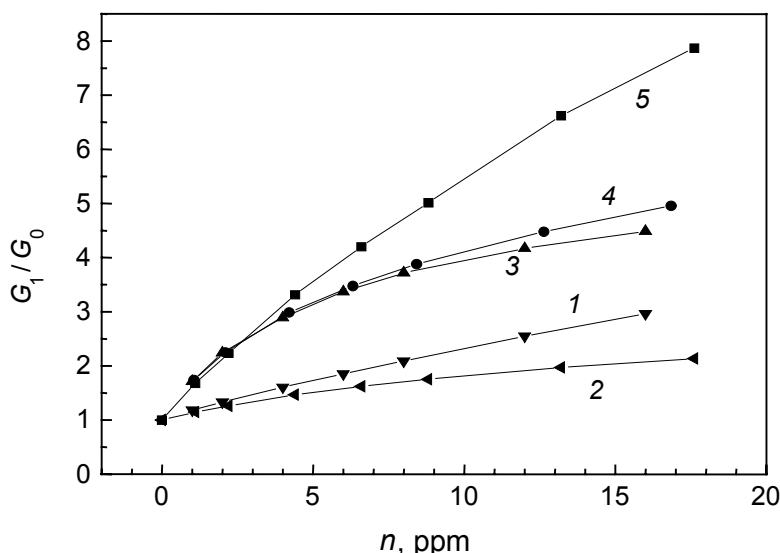


Рис. 3. Концентрационные зависимости отклика на 8 ppm ацетона, измеренные при рабочей температуре 670 К, после завершения испытаний сенсоров из серий: кр. 1 – (1), кр. 2 – (2), кр. 3 – (3), кр. 4 – (4), кр. 5 – (5)

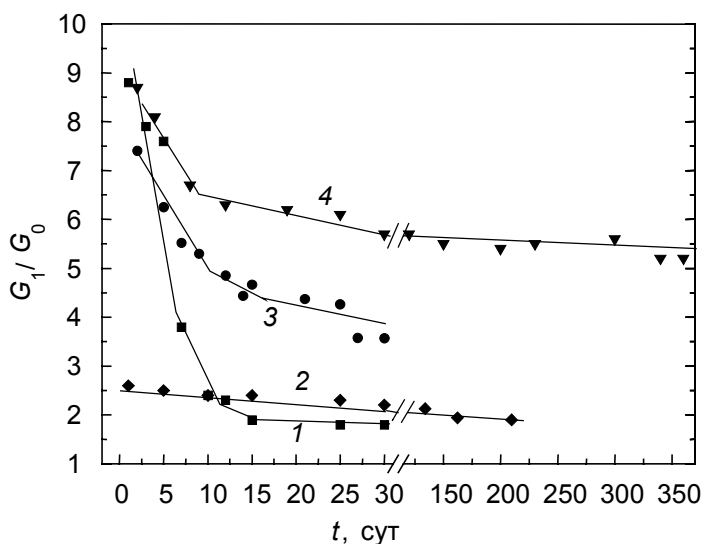


Рис. 4. Зависимости от длительности испытаний значений отклика на 8 ppm ацетона, измеренных при рабочей температуре 670 К, сенсоров из серий: кр. 1 – (1), кр. 2 – (2), кр. 3 – (3), кр. 4 – (5)

Далее обсудим полученные результаты. В основе детектирования паров ацетона лежит реакция окисления адсорбированных молекул с участием предварительно хемосорбированных ионов кислорода, которая протекает при повышенных (> 620 К) температурах, когда на поверхности преобладает атомарный кислород. В результате плотность ионов кислорода снижается, проводимость растет. В работе [14] с использованием метода хроматографии показано, что при взаимодействии ацетона с поверхностью толстопленочных образцов диоксида олова, в том числе и при

высоких температурах, образуются продукты неполной конверсии ацетона, которые могут накапливаться на поверхности полупроводника и блокировать центры адсорбции кислорода. Высказано предположение [14], что введение каталитических кластеров Au, приводящее к ускорению процесса окисления, позволяет снизить образование ряда продуктов конверсии ацетона на поверхности толстых пленок SnO₂.

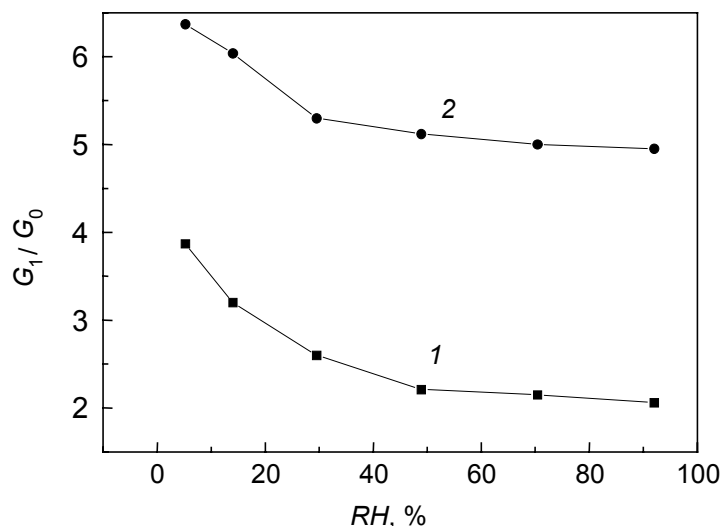


Рис. 5. Зависимости от уровня влажности отклика на 8 ppm ацетона, измеренные при рабочей температуре 670 К, после завершения испытаний сенсоров из серий: кр. 1 – (2), кр. 2 – (5)

Центрами адсорбции кислорода являются главным образом сверхстехиометрические атомы олова, обычно присутствующие на поверхности полупроводника, а также нанесенные окислительные катализаторы Pt, Pd [18]. Рост R_0 в изученных тонкопленочных сенсорах свидетельствует об увеличении плотности хемосорбированного кислорода в присутствии дисперсных слоев Pt/Pd на поверхности SnO₂ и при введении добавок Ni и Co, причем максимальные значения сопротивления наблюдаются в образцах из серии (5) с высоким содержанием кобальта. На основе изучения влияния тех же добавок на характеристики сенсоров водорода и их долговременную стабильность в работе [16] высказано предположение, что при кристаллизации напыленных пленок в процессе термического отжига атомы 3d-металлов в объеме SnO₂ частично сегрегируют на поверхности микрокристаллов и образуют связи с решеточным кислородом, остаются дополнительные атомы сверхстехиометрического олова, плотность центров адсорбции кислорода растет. Важно отметить, что при длительном воздействии молекулярного водорода (в противоположность характеру деградации свойств сенсоров ацетона) наблюдается рост сопротивления пленок и отклика на водород. В отсутствие добавок никеля и кобальта атомарный водород, выделяющийся при диссоциативной адсорбции H₂, способен взаимодействовать с решеточным кислородом и частично восстанавливать выходящие на поверхность молекулы диоксида олова. Происходит рост плотности атомов сверхстехиометрического олова, являющихся центрами адсорбции кислорода. Если связи с кислородом Ni и Co более прочные, чем Sn, то при длительных испытаниях образцов с этими примесями атомарный водород окисляется не решеточным, а преимущественно хемосорбированным кислородом, стабильность характеристик сенсоров увеличивается.

Высокой плотности хемосорбированного кислорода в свежеприготовленных сенсорах соответствуют максимальные значения откликов на ацетон (см. табл. 1). При длительных испытаниях при воздействии паров ацетона при рабочей температуре 670 К возможно постепенное накопление на поверхности продуктов неполной его конверсии, для десорбции которых требуются более высокие температуры, что приводит к увеличению T_{\max} (рис. 2, см. табл. 2). Происходит снижение плотности центров адсорбции кислорода (и возможно ацетона), сопровождающееся уменьшением R_0 и G_1/G_0 . Эти эффекты в меньшей степени выражены в присутствии нанесенных на поверхность и введенных в объем добавок золота, которые, по-видимому, и в случае тонких пленок частично предотвращают накопление продуктов окисления ацетона. В случае сенсоров из серии (5) с мак-

симальным содержанием Au и Co совместное использование этих примесей обеспечивает повышенную стабильность и достаточно высокие значения отклика при 670 К после длительных испытаний.

Установленные закономерности позволяют высказать предположение, что из ряда рассмотренных в [4, 14] возможных путей окисления ацетона на поверхности изученных тонких пленок диоксида олова реализуются реакции, не сопровождающиеся выделением атомарного водорода [4]:



Влияние влажности на свойства сенсоров определяется тем, что при адсорбции на поверхность микрокристалла SnO_2 молекула H_2O диссоциирует на протон H^+ и гидроксильную группу OH^- и компенсирует заряд одного адсорбированного иона кислорода O^- [17]. Плотность хемосорбированного кислорода снижается, растет проводимость сенсоров в чистом воздухе, значения откликов на восстановительные газы (водород, монооксид углерода и др.) уменьшаются по мере роста уровня влажности. В [18] были обобщены литературные данные и результаты исследований влияния уровня влажности на свойства тонких пленок диоксида олова с добавками благородных металлов. Показано, что если сенсоры, модифицированные золотом, не подвергаются длительному воздействию атомарного водорода, который способствует росту плотности центров адсорбции кислорода и молекул воды, то параметры сенсоров некоторых газов, на пример диоксида азота, отличаются слабой зависимостью от RH . Возможно, отсутствие выделения атомарного водорода в ходе реакций (1) – (3) обеспечивает стабильность откликов образцов из серий (2) и (5) на пары ацетона в диапазоне изменения относительной влажности 30–90 %.

Заключение

На основе выполненных в работе исследований установлено, что полученные методом магнетронного напыления тонкие (около 100 нм) нанокристаллические пленки диоксида олова характеризуются высокими значениями отклика на низкие (на уровне 1 ppm) концентрации паров ацетона при наличии на поверхности высокой плотности центров адсорбции кислорода, которая может быть обеспечена нанесенными дисперсными слоями каталитических Pt/Pd, а также введенными в объем пленок добавками Ni и Co. Таким образом, подтверждено высказанное в работе [16] предположение, что при кристаллизации напыленных пленок в процессе термического отжига атомы 3d-металлов в объеме SnO_2 частично сегрегируют на поверхности микрокристаллов и образуют связи с решеточным кислородом, остаются атомы сверхстехиометрического олова, плотность центров адсорбции кислорода растет.

В процессе долговременных испытаний при воздействии паров ацетона происходит снижение сопротивления пленок и значений отклика, причем наиболее заметно меняется G_1/G_0 для пленок из серии (1) с нанесенными окислительными катализаторами Pt/Pd, способствующими диссоциативной адсорбции молекул ацетона. По-видимому, важную роль играет образование продуктов неполного окисления ацетона, для удаления которых требуются достаточно высокие рабочие температуры сенсоров не ниже 670 К. Возможно постепенное накопление на поверхности этих продуктов, способных блокировать центры адсорбции кислорода и ацетона. Эти эффекты в меньшей степени выражены в присутствии нанесенных на поверхность и введенных в объем добавок золота, которые частично предотвращают накопление продуктов неполного окисления ацетона. В случае сенсоров из серии (5) с максимальным содержанием Au и Co совместное использование этих примесей обеспечивает повышенную стабильность и достаточно высокие значения отклика $G_1/G_0 = 5.3\text{--}5$ на 8 ppm паров ацетона при 670 К после длительных (свыше года) испытаний и могут быть успешно использованы для создания ацетономеров.

Показано, что сенсоры из серии (1), модифицированные золотом, и в особенности из серии (5) с максимальными в условиях данного эксперимента количествами введенных в объем пленок добавок Au и Co отличаются стабильностью параметров в условиях меняющейся влажности в диапазоне $RH = 30\text{--}90\%$, что представляет интерес при использовании сенсоров для анализа выдыхаемого человеком воздуха, для которого $RH \sim 90\%$.

Анализ установленных закономерностей и сопоставление с противоположным характером изменения параметров аналогичных пленок при длительном воздействии водорода [16] позволяют выделить реакции (1) – (3) в качестве наиболее вероятного пути окисления ацетона на поверхности всех изученных пленок диоксида олова, который не предполагает выделение и окисление атомарного водорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manolis A. // Clin.Chem. – 1983. – V. 29. – No. 1. – P. 5–15.
2. Yu J.B., Byunb H.G., Soc M.S., et al. // Sens. Actuat. B. – 2005. – V. 108. – P. 305–308.
3. Guo D., Zhang D., and Zhang L. // Sens. Actuat. B. – 2011. – V. 158. – P. 43–53.
4. Righettoni M. and Tricoli A. // Anal. Chem. – 2010. – V. 82. – P. 3581–3587.
5. Cheng J.P., Wang B.B., Zhao M.G., et al. // Sens. Actuat. B. – 2014. – V.190. – P. 78–85.
6. Kim N.H., Choi S.J., Kim S.Y., et al. // Sens. Actuat. B. – 2016. – V. 224. – P. 185–192.
7. Sevastyanov E.Y., Maksimova N.K., Khludkova L.S., et al. // BioNanoSci. – 2016. – P. 1–5. DOI: 10.1007/s12668-016-0377-8.
8. Korotcenkov G. and Cho B.K. // Sens. Actuat. B. – 2014. – V.198. – P. 316–341.
9. Korotcenkov G., Boris I., Brinzari V., et al. // Sens. Actuat. B. – 2013. – V.182. – P.112– 124.
10. L.Li, Chuangchang G., and Li Sh. // Sens. Actuat. B. – 2010. – V. 150. – P. 806–810.
11. Choi U.-S., Sakai G., Shimano K., et al. // Sens. Actuat. B. – 2004. – V. 98. – P.166–173.
12. Korotcenkov G. and Sang D.-H. // Mater. Chem. Phys. – 2009. – V. 113. – P. 756–763.
13. Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Buvailo A.I., et al. // Sens. Actuat. B. – 2012. – V. 174. – P. 39–44.
14. Кривецкий В.В., Понзони А., Комини Э. и др. // Неорган. материалы. – 2010. – Т. 46. – № 10. – С. 1218–1224.
15. Хлудкова Л.С., Максимова Н.К., Кучерявенко В.С. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8/2. – С. 138–139.
16. Севастьянов Е.Ю., Максимова Н.К., Потеев А.И. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 7. – С. 13–16.
17. Гаман В.И., Севастьянов Е.Ю., Максимова Н.К. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 12. – С. 96–102.
18. Максимова Н.К., Севастьянов Е.Ю., Сергейченко Н.В., Черников Е.В. // Полупроводниковые тонкопленочные газовые сенсоры. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 164 с.

¹ Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Томского государственного университета, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 07.07.17.

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Севастьянов Евгений Юрьевич, к.т.н., зав. лабораторией, e-mail: sese@ngs.ru;

Максимова Надежда Кузьминична, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: nkmax3@yandex.ru;

Потеев Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, директор СФТИ ТГУ, профессор НИ ТГУ, e-mail: potekae@spiti.tsu.ru;

Хлудкова Людмила Станиславовна, ведущ. инженер, e-mail: lskhlud@yandex.ru;

Черников Евгений Викторович, ведущ. технолог, e-mail: evvch192184@gmail.com;

Давыдова Тамара Анатольевна, ведущ. технолог, e-mail: tadavydov@yandex.ru.