

УДК 538.9

СЕНСОРНЫЕ СЛОИ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОЧАСТИЦ И ИХ ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА

© 2023 г. Л. И. Трахтенберг^{1, 2*}

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: litrakh@gmail.com

Поступила в редакцию 18.10.2022;

после доработки 08.11.2022;

принята в печать 21.11.2022

Анализируются работы по моделированию распределения заряда в полупроводниковых наночастицах. Распределение заряда во многом зависит от вида наночастиц и концентрации электронов проводимости. В случае наночастиц с высоким содержанием электронов в зоне проводимости большую роль играет отрицательно заряженный слой, от которого зависят проводимость и сенсорный эффект. Показано, что как распределение электронов, так и сенсорный эффект существенно различаются в одно- и двухкомпонентных системах. Обсуждаются причины этого различия.

Ключевые слова: моделирование, доноры электронов, наночастицы, кондуктометрический сенсор, распределение заряда, отрицательно заряженный поверхностный слой, одно- и двухкомпонентные системы, ловушки электронов.

DOI: 10.31857/S0207401X2305014X, EDN: PCONYX

ВВЕДЕНИЕ

Механизм сенсорного эффекта для полупроводниковых датчиков хорошо известен [1–4]. Донорные примеси в оксидной наночастице – кислородные вакансии обеспечивают заметную плотность электронов в зоне проводимости. Атомы кислорода, появившиеся в результате адсорбции и последующей диссоциации молекул кислорода на поверхности металлоксидных наночастиц ($O_2^{ad} \rightarrow 2O^{ad}$), являются более глубокими ловушками электронов, чем кислородные вакансии. Адсорбированные атомы кислорода захватывают электроны ($O^{ad} + e^- = O^{(-)ad}$), и проводимость системы резко уменьшается. Далее происходит адсорбция на поверхность наночастицы молекул газов-восстановителей (H_2 , CO, ...), с которыми реагируют ионы кислорода ($H_2^{ad} + O^{(-)ad} \rightarrow H_2O^{des} + e^-$); при этом электроны освобождаются и переходят в зону проводимости. Проводимость системы увеличивается, и наблюдается сенсорный эффект.

Попыткам моделирования сенсорных процессов посвящено довольно много работ. Их обсуждение представлено в обзоре [3], где указывается на сделанные в этих исследованиях многочисленные ошибочные предположения. Среди них отметим следующие:

а) использование идеализированной плоской границы между наночастицами;

б) отсутствие зависимости количества электронов на поверхности от их концентрации в объеме;

в) использование постоянной, не зависящей от положения в наночастице плотности положительно заряженных ионизованных доноров. Это предположение справедливо, только если доноры полностью ионизованы.

Кроме того, распределение электронов в сферической полупроводниковой наночастице было получено в предположении неподвижных положительных зарядов, равномерно распределенных по объему наночастиц, и произвольно выбранной концентрации поверхностных электронов. Некоторые из неточностей связаны с переоцененным вкладом поверхностного отрицательно заряженного слоя.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Кондуктометрические сенсоры можно разбить на два класса в зависимости от плотности проводящих электронов в чувствительном слое. Первый класс – датчики с низкой плотностью электронов в зоне проводимости. Будем исходить из данных по чувствительному слою на основе SnO_2 , для которого плотность электронов проводимости $n_c < 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а на одну наночастицу диаметром $d = 100 \text{ нм}$ при-

ходится не более одного электрона. Ясно, что в этом случае отрицательно заряженный слой отсутствует и нет помех для переноса электронов за счет экранировки.

Второй класс — это сенсоры, у которых плотность электронов проводимости в чувствительном слое при рабочих температурах высока (например, в наночастицах In_2O_3 величина n_c достигает $10^{19}–10^{20} \text{ см}^{-3}$) [5, 6]. В одной наночастице с $d = 100 \text{ нм}$ в данном случае находится уже около 10^4 электронов, и достаточно много из них захватывается адсорбированными атомами кислорода на поверхности наночастиц. То есть отрицательно заряженный слой в наночастицах In_2O_3 существует, но следует учесть, что вследствие большого числа ионов O^- на поверхности последние заряжаются равномерно. Согласно известной теореме Гаусса, электрическое поле внутри наночастицы от равномерно распределенного на ее поверхности заряда равно нулю. Вне наночастицы, вследствие ее электронейтральности, поле также равно нулю.

Следовательно, поверхностный отрицательно заряженный слой не создает поле, которое непосредственно влияет на перенос заряда между частицами. Электрическое поле и ток в системе определяются изменением плотности электронов проводимости в приповерхностном слое наночастицы, и для нахождения этой величины необходимо рассчитать распределение зарядов по радиусу наночастицы. Также рассмотрим возможности сопоставления экспериментальных и теоретических результатов по проводимости и сенсорному эффекту для полупроводниковых систем на основе одинарных и смешанных оксидов.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОЧАСТИЦАХ

Для сенсоров первого класса на основе наночастиц с низким содержанием электронов проводимости никаких проблем с распределением заряда быть не может, так как вследствие отсутствия отрицательно заряженного слоя положительный и отрицательный заряды равномерно распределены по объему.

Для сенсоров второго класса ситуация гораздо более сложная. Электронов в наночастице, как уже отмечалось, довольно много, и для нахождения их распределения по радиусу следует записать выражение для свободной энергии системы. Последняя включает в себя как свободные энергии электронов проводимости, так и энергию, связанную с положительно заряженными ионизованными донорами. Кроме того, в нее входят потенциальная энергия взаимодействия всех положительных и отрицательных зарядов наночастицы, а также свободная энергия электронов, за-

хваченных адсорбированными атомами кислорода [7]. После минимизации полной свободной энергии по химическому потенциалу полученные уравнения дополняются системой балансных уравнений для концентраций молекул и атомов кислорода на поверхности наночастиц, которые захватывают электроны из их объема.

Решение этих уравнений по методике, изложенной в работах [7, 8], дает распределение электронов проводимости вдоль радиуса наночастицы в зависимости от температуры окружающей среды для наночастиц различных радиусов. На рис. 1а (сплошные кривые) представлены зависимости плотности электронов проводимости от расстояния до центра наночастицы In_2O_3 при различных температурах. Нетрудно видеть, что распределение неоднородно и с возрастанием температуры эта неоднородность увеличивается. Такое поведение легко понять, если учесть быстрый рост с повышением температуры количества электронов, захваченных адсорбированными атомами кислорода на поверхности наночастиц (рис. 1б, кривая 1) [9].

Кроме того, кривая 1 на рис. 1б имеет максимум в области температуры $T = 800 \text{ К}$. Его происхождение связано с активационным характером процессов диссоциативной адсорбции и десорбции. Вследствие конкуренции этих двух процессов величина N_{O^-} вначале растет с повышением температуры, а затем роль десорбции возрастает, и N_{O^-} начинает уменьшаться.

Захват адсорбированными атомами кислорода электронов проводимости, в результате которого распределение заряда в наночастицах становится неоднородным, приводит к возникновению сильного электрического поля в приповерхностном слое. На рис. 2 представлены радиальные зависимости величины электрического поля для разных размеров наночастицы и температур [11]. Величина поля довольно сильно зависит от радиуса наночастицы (R_0) и гораздо слабее — от температуры. Оказалось, что возникшее электрическое поле становится заметным достаточно далеко от центра наночастицы (при $R/R_0 \approx 0.9$) и его максимальное значение всего на три порядка меньше, чем у внутриатомного.

ПРОВОДИМОСТЬ И СЕНСОРНЫЙ ЭФФЕКТ ДЛЯ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМ

Проводимость и сенсорные свойства чувствительного слоя определяются плотностью носителей заряда в области контактов между наночастицами, суммарная площадь которых существенно меньше площади сечения пленки [12]. Для сенсоров первого класса электроны проводимости равномерно распределены по объему [12, 13], а в слу-

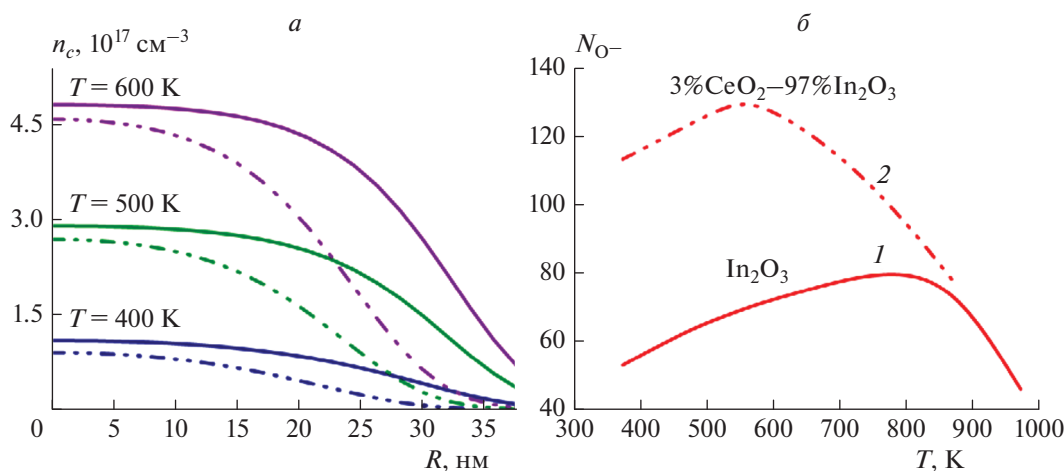


Рис. 1. *а* — Зависимость плотности электронов проводимости от расстояния R до центра наночастицы: сплошные кривые соответствуют изолированной наночастице, а штрих-пунктирные — наночастице, взаимодействующей с кластером CeO_2 в системе 3% CeO_2 — 97% In_2O_3 . *б* — Зависимость числа захваченных электронов N_{O^-} на поверхности наночастицы от температуры. Кривые 1 и 2 соответствуют изолированной наночастице и наночастице, взаимодействующей с кластером CeO_2 . Радиус наночастицы $R_0 = 35$ нм, а радиус кластера — 3 нм, что соответствует экспериментальным данным [9, 10].

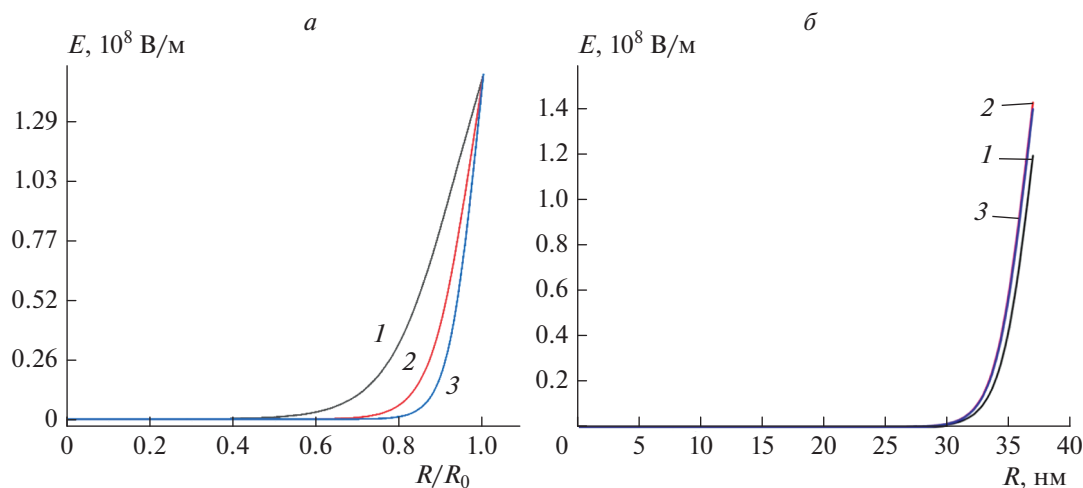


Рис. 2. Зависимость величины напряженности электрического поля от расстояния R до центра наночастицы; *а* — $R_0 = 17$ нм (1), 27 нм (2), 35 нм (3), $T = 600$ К; *б* — $R_0 = 35$ нм, $T = 550$ К (1), 600 К (2), 630 К (3) [11].

чае заметных плотностей носителей заряда их концентрация в приповерхностном слое определяется из распределений типа представленных на рис. 1а, полученных по методике, описанной в работах [7, 8].

Проводимость структурированных на наноровне пленок SnO_2 , ZnO и In_2O_3 в интервале температур 130–550 °С подробно изучалась в работах [13–16] (см. также обзор [3]). Что касается пленки SnO_2 , то в исследованном интервале температур проводимость растет по закону Аррениуса с энергией активации в 10,8 ккал/моль. В пленке ZnO проводимость также растет, но ее поведение не-

сколько отклоняется от закона Аррениуса, что связано с уменьшением при повышении температуры числа кислородных центров хемосорбированных на поверхности наночастиц.

Температурная зависимость проводимости пленок In_2O_3 имеет более сложный вид [14, 17]. Проводимость сначала слабо растет при повышении температуры от 130 °С, затем, после достижения $T = 250$ °С, резко падает, а при $T > 400$ °С снова увеличивается. Предполагалось, что такой характер проводимости связан с изменением вида хемосорбированных кислородных центров на поверхности нанокристаллов In_2O_3 . Нельзя исклю-

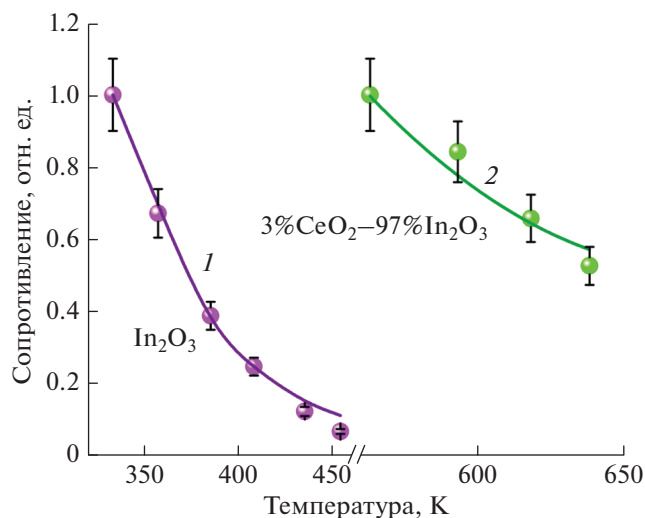


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и теоретические (фиолетовая (1) и зеленая (2) кривые) зависимости от температуры сопротивления полупроводниковых пленок In_2O_3 и $\text{CeO}_2\text{--In}_2\text{O}_3$ [9]. Измерения проводили в сухой атмосфере. В расчетах использовались значения радиусов наночастиц In_2O_3 и CeO_2 , равные 35 и 4 нм соответственно. Значения сопротивления для крайних левых точек на кривых, соответствующих In_2O_3 и $\text{CeO}_2\text{--In}_2\text{O}_3$, равны 135 и 200 кОм соответственно. Теоретические зависимости построены с учетом распределения электронов по радиусу наночастицы.

чать также структурные изменения, вызванные фазовыми переходами, которые, как показали исследования сопротивления в вакууме, происходят в нанокристаллах In_2O_3 в области $T = 180\text{--}200^\circ\text{C}$.

Теоретическая температурная зависимость проводимости структурированной на наноуровне

пленки In_2O_3 в интервале $T = 340\text{--}450$ К (т.е. при температурах, когда еще нет изменений ни в структуре, ни в адсорбционном слое) [9] хорошо согласуется с экспериментальной зависимостью [17] (рис. 3, кривая 1).

Проводилось также сопоставление теоретических и экспериментальных результатов по сенсорным свойствам однокомпонентных систем. Для этого система балансных уравнений для концентраций молекул и атомов кислорода на поверхности наночастиц была дополнена уравнениями, описывающими процессы с участием детектируемого газа [8, 12, 13, 18]. В результате решения этих уравнений удалось определить концентрацию электронов проводимости в двух случаях: в присутствии и отсутствие детектируемого газа. Отношение этих концентраций, $n_c(R_0; T, P_{\text{H}_2})/n_c(R_0; T, 0)$, дает зависимость чувствительности сенсора $\Theta(R_0, T, P_{\text{H}_2})$ от среднего радиуса наночастиц (R_0), температуры (T) и давления детектируемого газа (P_{H_2}).

Полученные теоретические зависимости были сопоставлены с имеющимися экспериментальными результатами. В качестве примера на рис. 4 представлены данные по экспериментальной (а) [19] и теоретической (б) [13] температурным зависимостям чувствительности сенсора с довольно большим средним размером наночастиц SnO_2 при различных концентрациях анализируемого газа H_2 .

Результаты сопоставления эксперимента и теории для сенсора с существенно меньшим размером наночастиц ($R_0 = 60$ нм) представлены на рис. 5 [13]. Все теоретические кривые на каждом из рис. 4 и 5 получены для одинаковых наборов параметров модели. Видно, что хорошее количественное согласие теоретических и эксперимен-

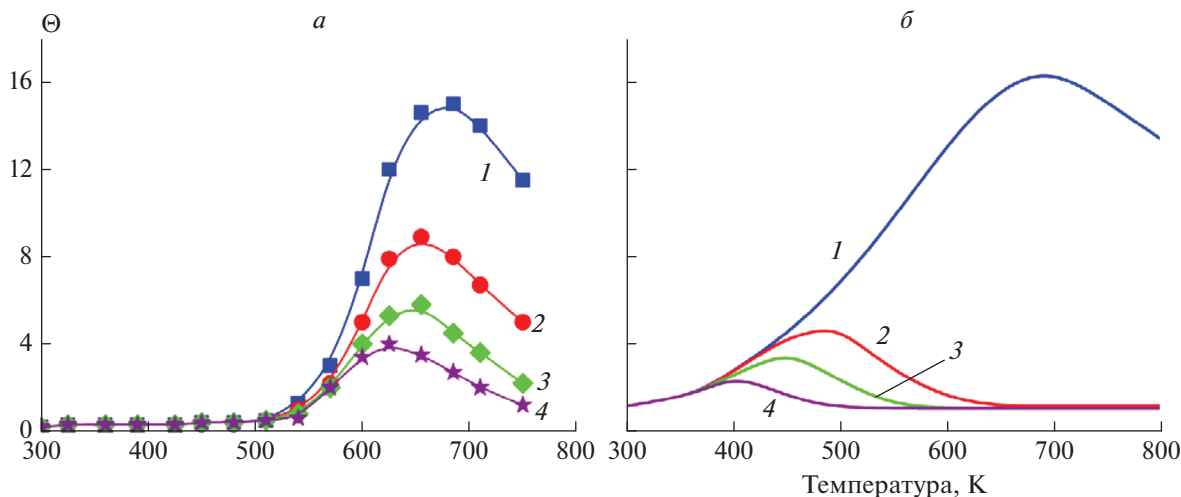


Рис. 4. Экспериментальная [19] (а) и теоретическая [13] (б) зависимости чувствительности Θ сенсора SnO_2 от температуры для различных концентраций водорода в окружающей среде: 1 — 10000 ppm, 2 — 2500 ppm, 3 — 500 ppm, 4 — 100 ppm. Средний радиус наночастиц равен 250 нм.

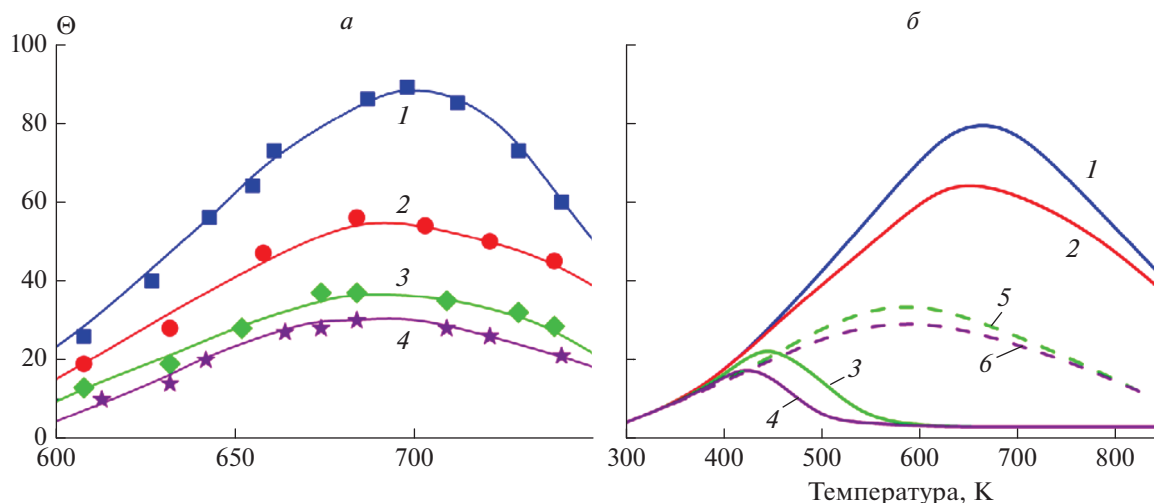


Рис. 5. Экспериментальные (а) и теоретические (б) зависимости чувствительности Θ сенсора SnO_2 от температуры для различных концентраций водорода в окружающей среде [13]: 1 – 1100 ppm, 2 – 550 ppm, 3 – 212 ppm, 4 – 106 ppm. Средний радиус наночастиц равен 60 нм. Штриховые кривые на рисунке 5б соответствуют учету зависимости предельной плотности кислорода на поверхности наночастиц $N_{\text{O}_2}^{\text{lim}} = 1.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ от концентрации водорода: 5 – 212 ppm, 6 – 106 ppm. Сплошные кривые на рис. 5б соответствуют $N_{\text{O}_2}^{\text{lim}} = 4.0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

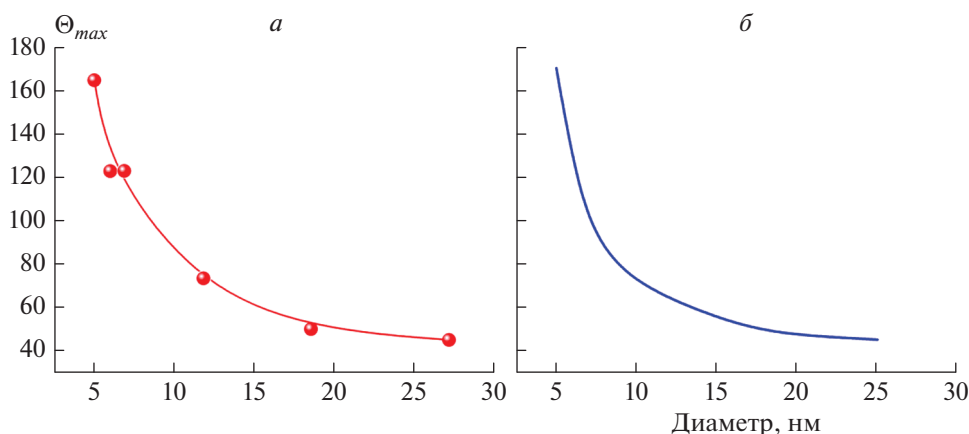


Рис. 6. Экспериментальная [20] (а) и теоретическая [12, 13] (б) зависимости максимальной чувствительности Θ_{max} сенсора In_2O_3 к водороду от среднего размера наночастиц SnO_2 .

тальных результатов достигается при высоких концентрациях водорода. Как показано на рис. 5б, лучшего согласия теории и эксперимента в области низких концентраций H_2 можно достичь, если учесть, что предельная плотность молекул кислорода на поверхности наночастиц ($N_{\text{O}_2}^{\text{lim}}$) может зависеть от концентрации водорода [13].

Имеются также экспериментальные данные [20], описывающие зависимость чувствительности сенсора SnO_2 от размера наночастиц (рис. 6а). Как показано в работе [12], максимальная теоретическая чувствительность сенсора растет с уменьшением среднего размера наночастиц. Прямые рас-

четы зависимости чувствительности сенсора SnO_2 от размера наночастиц демонстрируют неплохое совпадение теоретических и экспериментальных результатов (см. рис. 6а и 6б) [13].

Наряду с сенсорами SnO_2 , которые характеризуются низкой концентрацией электронов проводимости в чувствительном слое, были экспериментально и теоретически изучены также сенсоры на основе In_2O_3 [8, 18]. Чувствительный слой этих сенсоров содержит большую концентрацию электронов проводимости. На рис. 7 представлены данные по зависимости чувствительности этих сенсоров от температуры для различных концентраций водорода в воздухе. Значения параметров подбери-

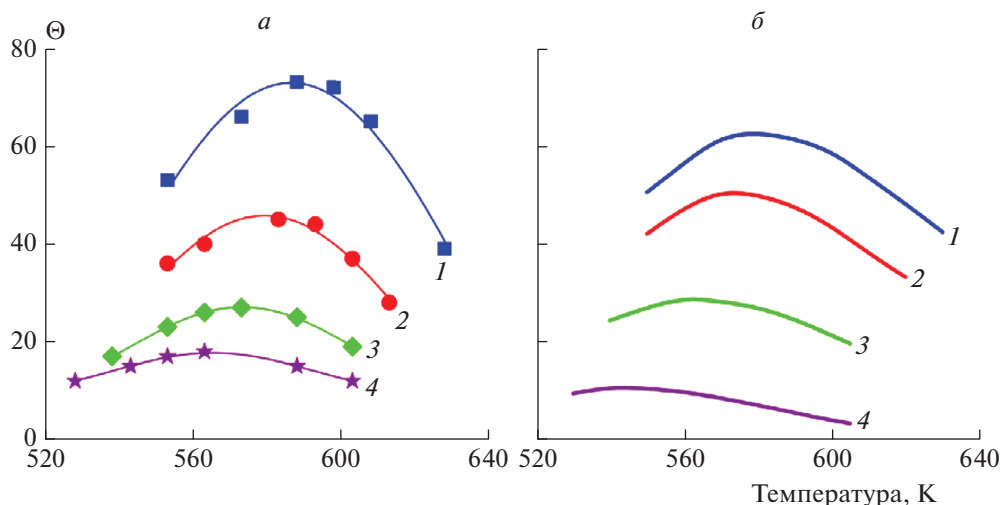


Рис. 7. Экспериментальная (а) и теоретическая (б) зависимости чувствительности сенсора In_2O_3 от температуры для различных концентраций водорода [8]: 1 – 1100 ppm, 2 – 570 ppm, 3 – 260 ppm, 4 – 120 ppm.

лись для теоретической кривой, соответствующей наибольшей концентрации водорода (1100 ppm), а остальные кривые строились при тех же параметрах системы.

Результаты, представленные на рис. 3–7, демонстрируют разумность предложенной модели для описания экспериментальных данных. Действительно, абсолютные величины максимальной чувствительности однокомпонентных сенсоров и температуры, при которых она достигается, близки к экспериментальным значениям для различных концентраций водорода. Очень важно, что для всех рассмотренных систем максимумы на теоретических кривых с понижением концентрации водорода не только уменьшаются, но и сдвигаются в область низких температур, т.е. демонстрируется та же закономерность, что и для экспериментальных кривых.

Вместе с тем следует отметить и некоторое несоответствие эксперимента и теории. Причины этого расхождения, на наш взгляд, следующие: в расчетах использовано среднее значение радиуса наночастиц вместо дисперсии размеров, а кроме того, вычисления проводились для сферических наночастиц, в то время как реальная форма частиц отнюдь не идеальная [8].

РОЛЬ ВТОРОГО КОМПОНЕНТА В СМЕШАННЫХ СИСТЕМАХ

Существуют различные возможности взаимодействия наночастиц, которые возникают в двухкомпонентных полупроводниковых сенсорных системах [10, 21]. Если коротко, то механизмы их взаимодействия заключаются в следующем: переход ионов металла и электронов между наноразмерными компонентами композита, а также пе-

ренос хемосорбированных молекул и продуктов их реакций с металлоксидом с поверхности одного компонента на поверхность другого [1, 22, 23]. Допирование наночастиц легко сводится к росту их дефектности и увеличению мест адсорбции кислорода, а взаимозаряжение наночастиц на сенсорный процесс не влияет. Поэтому в этой работе будет обсуждаться только последний механизм.

Структурированным на наноуровне системам на основе смешанных оксидов посвящено очень много экспериментальных работ (см., например, обзоры [3, 24, 25]), где обсуждались их проводящие и сенсорные свойства. Эти свойства во многом определяются взаимным влиянием одного компонента на электронную структуру другого. Так, в работе [9] впервые теоретически рассматриваются распределение электронов и проводящие свойства в смешанной системе. На примере системы $\text{CeO}_2\text{--In}_2\text{O}_3$, проведен учет влияния наноразмерных кластеров CeO_2 на распределение электронов в наночастице In_2O_3 . Отметим, что данная сенсорная система также подробно исследовалась экспериментально [3, 10, 25–28].

Экспериментальное изучение кинетики электронных и химических процессов в этой смешанной системе показало, что молекулярный кислород эффективно диссоциирует на поверхности наноразмерных кластеров CeO_2 [29], атомы кислорода переходят на поверхность наночастиц In_2O_3 и захватывают электроны из их объема [10]. В результате распределение электронов в объеме наночастицы становится более неоднородным (см. сплошные и штрих-пунктирные кривые на рис. 1а). Плотность электронов проводимости в приповерхностном слое уменьшается, что приводит к росту сопро-

тивления в смешанном оксиде по сравнению с однокомпонентным (ср. кривые 1 и 2 на рис. 2). Нетрудно видеть, что теоретические кривые на рис. 2 хорошо описывают экспериментальные точки [9].

Важно подчеркнуть, что в смешанной системе число захваченных электронов на поверхности наночастицы заметно возрастает по сравнению с однокомпонентной системой (кривая 2 на рис. 1б заметно выше кривой 1). Вследствие этого сенсорный эффект в смешанной системе в полном соответствии с экспериментальными данными [10, 25] также существенно повышается. Объяснить увеличение в несколько раз сенсорного эффекта в смешанной системе $\text{CeO}_2\text{--In}_2\text{O}_3$, приготовленной импрегнированием, по отношению к одинарной системе In_2O_3 можно следующим образом.

Необходимо учесть, что, как указано выше, в смешанных композитах на поверхности наночастиц In_2O_3 образуется множество каталитически активных малых кластеров CeO_2 с очень большой суммарной площадью поверхности [10]. Происходит дополнительное, по сравнению с одинарной системой, осаждение молекул кислорода из воздуха на поверхность кластеров CeO_2 с их последующей эффективной диссоциацией [29].

Далее атомы кислорода перетекают на поверхность наночастиц оксида индия, захватывают из этих наночастиц электроны проводимости, и число отрицательно заряженных ионов кислорода на поверхности наночастиц In_2O_3 существенно возрастает. Если в данную систему напустить восстановительный газ, например водород, то при его взаимодействии с O^- на поверхности наночастиц In_2O_3 образуются молекулы воды, которые испаряются, а электроны уходят в объем наночастиц [11].

Данный механизм участия наноразмерных кластеров CeO_2 в сенсорном процессе был заложен в систему кинетических уравнений. В ней в явном виде принимались во внимание реакции диссоциации, протекающие на поверхности кластеров CeO_2 , и перенос с них атомов кислорода на наночастицы In_2O_3 . Тем самым система уравнений была дополнена по сравнению с работами [8, 9], число уравнений в системе увеличилось, а также, по сравнению с работой [9], был добавлен член, описывающий сенсорную реакцию водорода с O^- . В результате учета указанных процессов была найдена зависимость величины чувствительности сенсоров от температуры [11], неплохо описывающая эксперимент [10] (см. рис. 8).

Нетрудно видеть, что чувствительность в двухкомпонентной системе приблизительно в три раза выше по сравнению с однокомпонентной (рис. 8), что объясняется дополнительным количеством O^- на поверхности богатых электронами наноча-

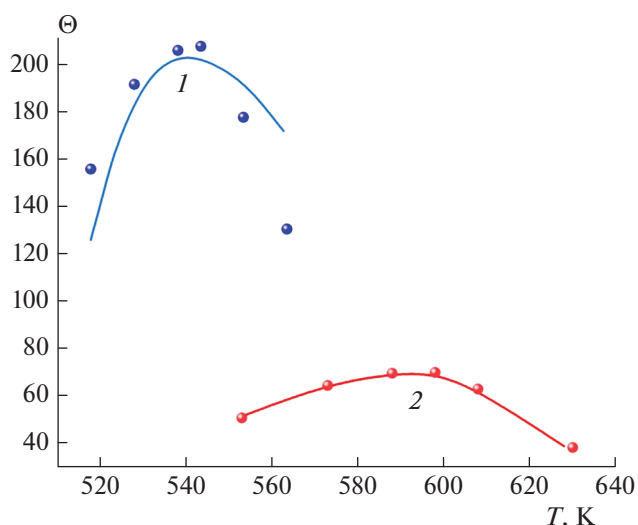


Рис. 8. Экспериментальные (точки) и теоретические (кривые) зависимости чувствительности Θ сенсоров от температуры для концентрации водорода 1000 ppm [10, 11]: 1 — сенсоры на основе In_2O_3 , 2 — смешанная система 3% CeO_2 — 97% In_2O_3 . Средний радиус наночастиц In_2O_3 равен 35 нм, а нанокластеров CeO_2 — 3.5 нм.

стиц In_2O_3 (см. кривые 1 и 2 на рис. 1б). Это дополнительное количество обязано перетеканию (спилловеру) атомарного кислорода, образовавшегося в результате диссоциативной хемосорбции молекулярного кислорода на поверхности каталитически активных наноразмерных кластеров CeO_2 .

Кроме того, кривая температурной зависимости чувствительности в двухкомпонентной системе смещена на 50 K влево относительно однокомпонентной системы (рис. 8). Такое поведение объясняется протеканием диссоциации кислорода на кластерах CeO_2 при более низких температурах по сравнению с диссоциацией на наночастицах In_2O_3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ экспериментальных и теоретических работ, посвященных проводящим и сенсорным свойствам однокомпонентных и смешанных оксидов. Смешанные оксиды, благодаря использованию каталитически активных и богатых электронами наночастиц, демонстрируют существенно более высокие сенсорные свойства по сравнению с однокомпонентными.

Рассмотрение проводится на основе моделирования электронной подсистемы полупроводниковых наночастиц. Показано, что с учетом взаимодействия наночастиц однокомпонентные и смешанные системы значительно различаются по

распределению электронов в объеме наночастицы и количеству электронов на ее поверхности.

Все вышесказанное проявляется и в различиях проводимости и сенсорных свойств таких систем. В смешанных системах на поверхности каталитически активных частиц протекают реакции диссоциации молекул. Образовавшиеся при этом атомы перетекают на богатые электронами наночастицы, захватывают электроны и образуют на их поверхности отрицательно заряженный слой. В смешанных системах этот слой – гораздо более насыщенный, чем в однокомпонентных. При появлении в атмосфере анализируемого газа он вступает в реакцию с O^- , продукты реакции испаряются, а электроны возвращаются в зону проводимости наночастицы. Так как в смешанных системах в отрицательно заряженном слое гораздо больше электронов, то и сенсорный эффект для них заметно выше.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00037.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barsan N., Weimar U. // J. Electroceram. 2001. V. 7. P. 143.
2. Yamazoe N., Shimanoe K. // Sens. Actuators, B. 2008. V. 128. P. 566.
3. Gerasimov G.N., Gromov V.F., Ilegbusi O.J., Trakhtenberg L.I. // Sens. Actuators, B. 2017. V. 240. P. 613.
4. Герасимов Г.Н., Громов В.Ф., Иким М.И., Трахтенберг Л.И. // Хим. физика. 2021. Т. 40. С. 65.
5. Prathap P., Gowri Devi G., Subbaiah Y.P.V., Ramakrishna Reddy K.T., Ganesan V. // Curr. Appl. Phys. 2008. V. 8. P. 120.
6. Jimenez L.C., Mendez H.A., Paez B.A., Ramirez M.E., Rodriguez H. // Brazilian J. Phys. 2006. V. 36. P. 1017.
7. Kozhushner M.A., Lidskii B.V., Oleynik I.I., Posvyanskii V.S., Trakhtenberg L.I. // J. Phys. Chem. C. 2015. V. 119. 16286.
8. Bodneva V.L., Ilegbusi O.J., Kozhushner M.A et al. // Sens. Actuators, B. 2019. V. 287. P. 218.
9. Kurmangaleev K.S., Ikim M.I., Kozhushner M.A., Trakhtenberg L.I. // Appl. Surf. Sci. 2021. V. 546. 149011.
10. Gerasimov G.N., Gromov V.F., Ikim M.I., Ilegbusi O.J., Trakhtenberg L.I. // Sens. Actuators, B. 2019. V. 279. P. 22.
11. Курмангалеев К.С. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИХФ РАН, 2022.
12. Kozhushner M.A., Trakhtenberg L.I., Landerville A.C., Oleynik I.I. // J. Phys. Chem. C. 2013. V. 117. 11562.
13. Kozhushner M.A., Trakhtenberg L.I., Bodneva V.L. et al. // Ibid. 2014. V. 118. P. 11444.
14. Бельшева Т.В., Герасимов Г.Н., Громов В.Ф. и др. // ЖФХ. 2010. Т. 84. С. 1706.
15. Trakhtenberg L.I., Gerasimov G.N., Gromov V.F., Belysheva T.V., Ilegbusi O.J. // Sens. Actuators, B: Chemical. 2012. V. 169. P. 32.
16. Trakhtenberg L.I., Gerasimov G.N., Gromov V.F., Belysheva T.V., Ilegbusi O.J. // Ibid. 2013. V. 187. P. 514.
17. Trakhtenberg L.I., Astapenko V.A., Sakhno S.V. et al. // J. Phys. Chem. C. 2016. V. 120. 23851.
18. Kozhushner M.A., Bodneva V.L., Oleynik I.I., Belysheva T.V., Ikim M.I., Trakhtenberg L.I. // Ibid. 2017. V. 121. P. 6940.
19. Ahlers S., Miller G., Doll T. // Sens. Actuators, B. 2005. V. 107. P. 587.
20. Xu C., Tamaki J., Miura N., Yamazoe N. // Ibid. 1991. V. 3. P. 147.
21. Gerasimov G.N., Ikim M.I., Gromov V.F., Ilegbusi O.J., Trakhtenberg L.I. // J. Alloys Compd. 2021. V. 883. 160817.
22. Нагаев Э.Л. // Успехи физических наук. 1992. Т. 162. С. 49.
23. Dey A. // Mat. Sci. Eng. B. 2018. V. 229. P. 206.
24. Yamazoe N., Kurorawa Y., Seiyama T. // Sens. Actuators, B. 1983. V. 4. P. 283.
25. Trakhtenberg L.I., Gerasimov G.N., Gromov V.F., Belysheva T.V., Ilegbusi O.J. // Sens. Actuators, B. 2015. V. 209. P. 562.
26. Xu L., Song H., Dong B. // Inorg. Chem. 2010. V. 49. 10590.
27. Jiang F., Zhao H., Chen H., Xu C., Chen J. // RSC Advances. 2016. V. 6. 72015.
28. Громов В.Ф., Иким М.И., Герасимов Г.Н., Трахтенберг Л.И. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 12. С. 76.
29. Yang F., Graciani J., Evans J. et al. // J. Amer. Chem. Soc. 2011. V. 133. P. 3444.