

Структура и газочувствительные свойства нанокompозита Fe₂O₃-SnO₂

М.И. Ивановская¹, Д.А. Котиков¹, Д.Р. Орлик¹, Г. Фалиа²

¹Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белгосуниверситета,
ул. Ленинградская 14, 20050 Минск, Беларусь.

²Национальный институт физики материалов университета г. Брешиа,
ул. Валотти 9, 25133 Брешиа, Италия

Исследованы структурные особенности и газочувствительные свойства нанокompозитов Fe₂O₃-SnO₂, полученных в виде тонких пленок и порошков термообработкой зольей гидроксидов олова и железа. В зависимости от соотношения Fe(III) и Sn(IV) образцы имеют структуру твердого раствора Fe(III) в SnO₂ (Fe:Sn 1:9 и 1:1) и Sn(IV) в α-Fe₂O₃ (Fe:Sn 9:1). При равном содержании Fe и Sn наряду с фазой твердого раствора Fe(III) в SnO₂ присутствует аморфная фаза Fe₂O₃. Присутствие свободной фазы Fe₂O₃, а также фазы твердого раствора Sn(IV) в Fe₂O₃ определяет высокую чувствительность Fe₂O₃-SnO₂ в виде тонких пленок к NO₂ и толстых пленок – к этанолу.

Введение

Диоксид олова является основным газочувствительным материалом химических сенсоров, предназначенных для обнаружения большого количества токсичных веществ в воздухе. Однако в газовых сенсорах современного типа, как правило, диоксид олова в чистом виде не используется по причине недостаточной чувствительности к некоторым газам и нестабильности характеристик во время эксплуатации. Для улучшения характеристик сенсоров в SnO₂ вводят благородные металлы и другие добавки, оказывающие влияние на адсорбционно-каталитические и электронные свойства диоксида олова [1].

Перспективными материалами для газовых сенсоров являются нанокompозиты, включающие несколько оксидов [2]. Имеются данные о том, что при совместном прокаливании оксидов олова и железа образуется материал с высокой чувствительностью к этанолу [3]. Модифицирование α-Fe₂O₃ ионами Sn(IV) и SO₄²⁻ приводит к повышению чувствительности Fe₂O₃ к этанолу [4]. В [5] отмечается, что чувствительность SnO₂ к этанолу повышают все катионы металлов, электроотрицательность которых меньше, чем Sn(IV). Величина электроотрицательности катионов может служить мерой активности оксидов в кислотно-основных реакциях. Следует, однако, иметь в виду, что процесс детектирования этанола металлоксидными сенсорами является многостадийным и включает стадии взаимодействия молекул спирта с оксидной поверхностью не только по кислотно-основному механизму, но и по окислительно-восстановительному [6]. Активность Fe₂O₃-SnO₂ в указанных процессах будет зависеть от структурно-фазового состояния композита.

Цель данной работы – синтез нанокompозита Fe₂O₃-SnO₂ с различным структурно-фазовым состоянием, изучение его структурных особенностей и оценка газочувствительных свойств по отношению к некоторым газам.

Методика эксперимента

В работе стояла задача получить образцы Fe₂O₃-SnO₂ в наноразмерном состоянии. Для синтеза оксидов Fe(III) и Sn(IV) в наноразмерном состоянии наиболее целесообразно использовать золь-гель метод, основанный на получении коллоидных растворов гидроксидов олова и железа [7]. Как правило, при совместном осаждении гидроксидов (СОГ) достигается высокая степень гомогенности оксидной структуры. Образцы являются аморфными даже при длительной высокотемпературной (600°C) обработке. В совместно осажденных образцах наблюдается повышенная по сравнению с равновесной растворимость компонентов друг в

друге. При раздельном синтезе золей с последующим их смешением оксиды в большей степени, чем в СОГ сохраняют свойства индивидуальных веществ. Поэтому для получения гетерофазных композитов более подходящим является метод раздельного синтеза золей и их смешения в требуемых соотношениях. Оксидные композиты с гетерогенной структурой по сравнению с гомогенными характеризуются в большинстве случаев большей термической стабильностью и более разнообразными адсорбционно-каталитическими свойствами.

Осадки гидроксидов Fe(III) и Sn(IV) получали путем осаждения из 0.1M растворов соответствующих солей раствором аммиака. После тщательного промывания осадки переводили в золи с помощью HNO₃. Золи смешивали в количествах, обеспечивающих получение образцов Fe₂O₃-SnO₂ с соотношением Fe:Sn 1:9, 1:1 и 9:1. Порошкообразные образцы получали высушиванием смешанных золей при 70°C с последующим прокаливанием при разных температурах. Порошки использовали для проведения структурных исследований и изготовления толсто пленочных сенсоров. Толсто пленочные сенсоры готовили нанесением в виде пасты порошкообразных образцов, прокаленных при 500°C, на специальные подложки из ситалла с платиновыми электродами и нагревателем [8]. Тонко пленочные сенсоры получали нанесением золей на подложку из α -Al₂O₃ (3x3x0.5 мм) с платиновыми электродами и нагревателем и золотыми контактами [9]. Температура прокаливании пленок 600°C. Оценивали чувствительность тонко пленочных сенсоров по отношению к 1 ppm NO₂ в воздухе, толсто пленочных – по отношению к этанолу во влажной атмосфере, моделирующей содержание алкоголя в выдыхаемом человеком воздухе [10]. Увлажненные спирто-воздушные смеси получали с помощью генератора этанола ГС-1. Выходной сигнал определяли при постоянном значении напряжения как $(I_{газ}-I_0)/I_0$ в случае тонко пленочных сенсоров и как $(R_0-R_{газ})/R_{газ}$ в случае толсто пленочных сенсоров, где I₀ и R₀ – значения силы тока и сопротивления чувствительного слоя на воздухе, а I_{газ} и R_{газ} – значения силы тока и сопротивления чувствительного слоя в детектируемой газовой смеси.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре HZG-4R с использованием Co K α -излучения и Fe-фильтра. Размеры кристаллитов определяли на основании анализа уширения рефлексов на рентгенограммах порошков.

Спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) записывали при 77 и 300 К на спектрометре VARIAN E112. Параметры спектров определяли относительно 2,2'-дифенил- β -пикрилгидразина ($g = 2,0036$). Мессбауэровские спектры от ядер ⁵⁷Fe и ¹¹⁹Sn записывали на спектрометре SM 2201 при 300 К с использованием ⁵⁷Co(Rh)-источника с энергией 15 мКи. Параметры спектров оценивали относительно Fe и SnO₂ соответственно.

Результаты и их обсуждение

Образцы Fe₂O₃-SnO₂ после прокаливании при 300-600°C являются наноразмерными (табл. 1). Дисперсность композитов выше, чем индивидуального SnO₂. Следует отметить, что в указанных условиях синтеза и термообработки диоксид олова также является наноразмерным. Средний размер кристаллитов в исследованных образцах не превышает 10 нм при прокаливании до 600°C.

По данным РФА после прокаливании при 500-600°C в образцах Fe₂O₃-SnO₂ с соотношением Fe:Sn 1:9 и 1:1 регистрируется фаза SnO₂, в образце с Fe:Sn 9:1 – фаза α -Fe₂O₃ (рис.1). Указанные фазы представляют собой твердые растворы замещения Fe(III) в SnO₂ и Sn(IV) в α -Fe₂O₃ соответственно. После прокаливании при 800°C происходит частичное разрушение структуры твердых растворов. Образцы становятся гетерофазными (см. табл. 1 и рис. 1).

Следует однако отметить, что образец Fe₂O₃-SnO₂ (Fe:Sn 1:1) и после прокаливании при 500°C не имеет строго гомогенной структуры. Наряду с регистрируемой рентгенографически фазой твердого раствора Fe(III)-SnO₂ он содержит микровключения аморфной фазы α -Fe₂O₃, о чем свидетельствуют данные ЭПР и мессбауэровской спектроскопии.

Спектр ЭПР образца Fe₂O₃-SnO₂ (Fe:Sn 1:1), прокаленного при 600°C, содержит два сигнала (рис. 2): более узкий сигнал I с $g = 4,3$ ($\Delta B = 4$ мТ) и очень широкий сигнал II с

$g \sim 2,04$ ($\Delta B = 52$ мТ). Сигнал I, наблюдаемый в SnO_2 , легированном Fe(III), относят к изолированным ионам Fe(III) в сильных кристаллических полях с ромбической симметрией [11]. Сильное кристаллическое поле может быть обусловлено как расположением Fe(III) в приповерхностных и поверхностных слоях SnO_2 , так и присутствием кислородных вакансий в ближайшем окружении Fe(III) в кристаллической решетке SnO_2 [12].

Интенсивность и форма широкого сигнала II при $g \sim 2,04$ зависит от температуры записи спектра. Форма спектра при 77 К позволяет предположить, что широкий сигнал II состоит из двух сигналов с $g \sim 2,3$ и $g \sim 2,0$. С учетом имеющихся в литературе данных сигнал с $g \sim 2,3$ относится к некристаллическим наночастицам Fe_2O_3 , в которых Fe(III) находится в окружении, более характерном для кубической решетки $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, чем тригональной решетки $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Сигнал с $g \sim 2,0$ обусловлен ассоциированными ионами Fe(III) и характерен для кластеров Fe_2O_3 , обладающих суперпарамагнитными свойствами.

Воздействие NO_2 на образец $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ вызывает изменение интенсивности и ширины сигнала II, сигнал I при этом остается неизменным (см. рис. 2). Неизменность сигнала I при воздействии активной газовой среды свидетельствует о том, что ионы Fe(III), замещающие Sn(IV) в узлах кристаллической решетки SnO_2 , не принимают участия в адсорбции молекул NO_2 . Адсорбция NO_2 происходит на участках поверхности композита $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$, принадлежащих микровключениям индивидуальной аморфной фазы Fe_2O_3 .

Мессбауэровский спектр на ядрах ^{57}Fe образца $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:1) представляет собой уширенный дублет с параметрами, указанными в табл. 2. Такой спектр характерен для суперпарамагнитных частиц Fe_2O_3 с размерами 3–4 нм. Суперпарамагнетизм является следствием не только малых размеров, но и высокой дефектности Fe_2O_3 . О высокой дисперсности образца свидетельствует уменьшение величины магнитного поля (B) в спектре $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ относительно объемного Fe_2O_3 . Большая величина квадрупольного расщепления в спектре может быть следствием неоднородности координационного окружения Fe(III) в $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$. По магнитным характеристикам аморфные участки Fe_2O_3 в $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ более сходны с $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, чем с $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Координация Fe(III), характерная для кубической структуры $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, имеет место и в гидроксиде Fe(III). Такой тип окружения сохраняются в аморфном Fe_2O_3 до перехода его в кристаллическую фазу $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (800°C). Наличие аморфной фазы Fe_2O_3 способствует стабилизации высокодисперсной фазы твердого раствора Fe(III)– SnO_2 с концентрацией Fe(III), превышающей равновесную.

Мессбауэровский спектр на ядрах ^{119}Sn представляет собой одиночную линию с параметрами, не отличающимися от характерных для SnO_2 . Присутствие Fe(III) в узлах кристаллической решетки SnO_2 не сказывается на параметрах спектра ^{119}Sn исследованного образца.

Проводимость на воздухе тонких пленок составов $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:9 и 1:1) значительно ниже, чем $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 9:1) и индивидуальных оксидов Fe_2O_3 и SnO_2 (рис. 3). Проводимость пленок $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 9:1) выше, чем пленок Fe_2O_3 . Характер температурной зависимости проводимости пленок $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 9:1) и $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ практически одинаков.

При 100 и 500°C проводимость пленок $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:9, 1:1) практически одинакова. Однако характер изменения проводимости пленок в интервале между указанными температурами различен. В случае пленок с Fe:Sn 1:9 в интервале 100–200°C изменение проводимости практически не происходит, а при дальнейшем повышении температуры до 500°C проводимость равномерно увеличивается. В случае же пленок с Fe:Sn 1:1 максимальное изменение проводимости имеет место в низкотемпературном интервале (100–200°C). Оба рассматриваемых образца содержат в своем составе фазу твердого раствора Fe(III)– SnO_2 . Электропроводность SnO_2 обусловлена присутствием однозарядных кислородных вакансий. Ионы Fe(III), замещая Sn(IV) в узлах кристаллической решетки SnO_2 , действуют как акцепторы электронов, тем самым уменьшая концентрацию носителей. Связанные в ассоциаты $[\text{Fe}^{3+}\text{-V}_\text{o}]$ ионы Fe(III) в SnO_2 не участвуют в электронном обмене [13]. Как следует из данных ЭПР, они не участвуют и в адсорбции газов (NO_2). Для

активации электронов и снижения сопротивления в случае твердого раствора Fe(III)–SnO₂ требуется повышение температуры до 450-500°C.

Образец Fe₂O₃-SnO₂ (Fe:Sn 1:1), как отмечено выше, наряду с фазой твердого раствора Fe(III)–SnO₂ содержит высокодефектную аморфную фазу Fe₂O₃. Высокодисперсные частицы золь гидроксидов железа и олова характеризуются высокой реакционной способностью и при нагревании вступают во взаимодействие друг с другом. Вероятно, на поверхности раздела фаз Fe₂O₃ и SnO₂ имеет место взаимодействие с образованием связей Sn–OH–Fe и Sn–O–Fe, что приводит к снижению сопротивления контактов и повышению проницаемости барьеров. При измерении на постоянном токе проводимость тонких полупроводниковых пленок определяется преимущественно поверхностной проводимостью [14]. Поверхностный слой аморфной фазы Fe₂O₃, легированной Sn(IV), обеспечивает более высокую проводимость пленок Fe₂O₃-SnO₂ (Fe:Sn 1:1) по сравнению с Fe₂O₃-SnO₂ (Fe:Sn 1:9). Введение Sn(IV) в Fe₂O₃ должно приводить к увеличению концентрации свободных носителей заряда и увеличению проводимости, что и наблюдается в случае пленок Fe₂O₃-SnO₂ (Fe:Sn 9:1) со структурой твердого раствора замещения Sn(IV)–α-Fe₂O₃.

Пленки Fe₂O₃-SnO₂ с различным соотношением компонентов и разной структурой характеризуются неодинаковой чувствительностью к веществам, обладающим окислительными (NO₂) и восстановительными (C₂H₅OH) свойствами (рис. 4, 5). Пленки Fe₂O₃-SnO₂ (Fe:Sn 9:1) имеют минимальную чувствительность как к NO₂, так и к C₂H₅OH. Максимальной чувствительностью к NO₂ характеризуются тонкие пленки Fe₂O₃-SnO₂ (Fe:Sn 1:1). При этом в области низких температур (100°C) NO₂ действует не как акцептор, а как донор электронов. Это может быть связано с тем, что до 150°C электропроводность Fe₂O₃-SnO₂ определяется присутствием на оксидной поверхности OH-групп, которые десорбируются при 150-400°C. Следует отметить, что максимум выходного сигнала на NO₂ тонкопленочных сенсоров Fe₂O₃-SnO₂ всех составов достигается при температурах, при которых наблюдается максимальное изменение сопротивления пленок на воздухе.

В случае толстопленочных сенсоров максимальный выходной сигнал на пары этанола во влажной атмосфере имеют пленки Fe₂O₃-SnO₂ (Fe:Sn 9:1), представляющие собой, как указано выше, твердый раствор Sn(IV)–α-Fe₂O₃. Такие пленки превосходят по чувствительности к этанолу как SnO₂, так и α-Fe₂O₃ (см. рис. 5). Детектирование этанола на поверхности композита Fe₂O₃-SnO₂, по-видимому, протекает по механизму окислительного дегидрирования [15]. В системе со структурой твердого раствора Sn(IV)–α-Fe₂O₃ имеются центры адсорбции двух типов – Sn(IV) и Fe(III), различающиеся по активности в реакциях превращения этанола по окислительно-восстановительному и кислотно-основному механизмам.

Относительной мерой активности оксидов в реакциях окисления может быть энергия связи кислорода с поверхностью оксида [16]. Активность оксидов в кислотно-основных реакциях зависит от электроотрицательности катионов [17]. Центры Sn(IV) катализируют процесс дегидрирования этанола [6]. Низкая энергия связи кислорода в Fe₂O₃ и повышенная по сравнению с SnO₂ основность благоприятствуют доокислению промежуточных продуктов превращения этанола на центрах Fe(III), тем самым увеличивая выходной сигнал сенсоров. В высокодисперсной структуре Sn(IV)–α-Fe₂O₃ обеспечивается эффективный обмен электронов между катионами: Fe(III) ↔ Fe(II).

Выводы

1. Золь-гель методом получены нанокompозиты $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$, различающиеся дисперсностью и структурно-фазовым состоянием. В зависимости от соотношения Fe:Sn в образцах $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ после прокаливания при 500-600°C образуются твердые растворы Fe(III)- SnO_2 (Fe:Sn 1:9, 1:1) и Sn(IV)- $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (Fe:Sn 9:1). В образце с равным содержанием Fe и Sn наряду с фазой твердого раствора Fe(III)- SnO_2 присутствует аморфная высокодефектная фаза Fe_2O_3 .
2. По данным ЭПР и мессбауэровской спектроскопии аморфная фаза Fe_2O_3 в образце $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:1) по структуре и магнитным свойствам в большей степени подобна кубической структуре $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, чем тригональной $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.
3. Газочувствительные и электрофизические свойства тонких и толстых пленок $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ зависят от состояния в них Fe(III). Изолированные ионы Fe(III), расположенные в узлах кристаллической решетки SnO_2 , существенно снижают проводимость пленок SnO_2 и их чувствительность как к окислительным (NO_2), так и к восстановительным ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) газовым средам. Высокая чувствительность к NO_2 композита $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:1) обусловлена присутствием в нем высокодисперсной аморфной фазы Fe_2O_3 . Нанокompозит $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ со структурой твердого раствора Sn(IV) в $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ характеризуется высокой чувствительностью к этанолу благодаря наличию в системе центров адсорбции двух типов, различающихся активностью в окислительно-восстановительных и кислотно-основных реакциях.

Работа выполнена при финансовой поддержке ИНТАС (проект № 2000-0066)

Литература

1. Ивановская М.И. Избр. научн. труды Белорус. гос. ун-та. Минск: БГУ, 2001, т. 5, С. 242-254.
2. Ivanovskaya M. // *Electron Technology*. 2000, Vol. 33, N 1/2, P. 51-55.
3. Tan O.K., Zhu W., Yan Q., Kong L.B. // *Sensors and Actuators B* 65. 2000, P. 361-365.
4. Chang W., Lee D. // *Thin Solid Films*. 1991, Vol. 200, P. 329-339.
5. Yamazoe N. // *Sensors and Actuators B* 5. 1991, P. 7-19.
6. Ivanovskaya M., Kotsikau D., Faglia G., Nelli P. // *Proc. Int. Conf. "Euroensors XVI"*. Prague, Czech Republic, Sept. 15-18, 2002, P.745-746.
7. Свиридов В.В., Браницкий Г.А. // *Химические проблемы создания новых материалов и технологий*. Минск. 1998, С. 293-322.
8. Ivanovskaya M., Bogdanov P., Barsan N., Kappler J. // *XIV Eur. Conf. on Solid State Transducers "Euroensors XIV"*. Copenhagen, Denmark, August, 2000, P. 65-66.
9. Ivanovskaya M., Bogdanov P., Faglia G., Sberveglieri G. // *Sensors and Actuators B* 68, 2000, P. 344-350.
10. Ивановская М.И., Богданов П.А., Романовская В.В., Орлик Д.Р. // *Журн. прикл. химии*. 1999, т. 72, № 8, С. 1328-1328.
11. Ануфриенко В.Ф., Яндралова Л.Г., Тарасова Д.В. // *Физика тв. тела*. 1971, т. 13, № 8, С. 2353-2356.
12. Ануфриенко В.Ф., Ярмухаметов Н.Г., Тарасова Д.В., Оленькова И.П. // *Кинетика и катализ*. 1973, т. 14, № 3, С.716-721.
13. Третьяков Ю.Д. *Химия нестехиометрических окислов*. Москва: Московский университет, 1974, 363 с.
14. Сухарев В.Я., Мясников И.А. // *Журн. физ. химии*. 1986, т. 60, № 10, С. 2385-2401.
15. Ivanovskaya M., Bogdanov P., Faglia G., Nelli P., Sberveglieri G., Taroni A. // *Sensors and Actuators B* 77. 2001, P. 268-274.
16. Голодец Г.И. *Механизм катализа. Часть 1. Природа каталитического действия*. Новосибирск: Наука, 1984, P. 142-158.
17. Крылов О.В. *Катализ неметаллами. Закономерности подбора катализаторов*. Ленинград: Химия, 1967, 240 с.

Таблица 1. Фазовый состав и размер кристаллитов индивидуальных оксидов Fe_2O_3 и SnO_2 и композитов на их основе в зависимости от температуры прокаливания

t, °C	SnO ₂ d, нм	Fe ₂ O ₃ d, нм	Fe ₂ O ₃ -SnO ₂					
			(Fe:Sn 9:1)		(Fe:Sn 1:1)		(Fe:Sn 1:9)	
			Фаза	d, нм	Фаза	d, нм	Фаза	d, нм
300	2	Аморфн.	Аморфн.	–	SnO ₂	2	SnO ₂	2
500	6	15	Fe ₂ O ₃	35	SnO ₂	3	SnO ₂	3
600	10	25	–	–	SnO ₂	4	–	–
800	40	70	Fe ₂ O ₃	50	SnO ₂	10	SnO ₂	10
			SnO ₂	10	Fe ₂ O ₃	25	Fe ₂ O ₃	35

Таблица 2. Параметры ^{57}Fe мессбауэровских спектров Fe_2O_3 и композитов Fe_2O_3 - SnO_2 , записанных при 300 К

Sample	δ , mm s ⁻¹	Δ , mm s ⁻¹	B, T
Fe ₂ O ₃ -SnO ₂ (Fe:Sn 1:1), 300°C	0.35±0.02	0.72±0.02	50.8
Fe ₂ O ₃ -SnO ₂ (Fe:Sn 1:1), 500°C	0.35±0.02	0.87±0.02	50.8
γ-Fe ₂ O ₃ (объемн.)	0.34±0.01	-0.053±0.020	49.6
α-Fe ₂ O ₃ (объемн.)	0.47±0.03	0.23±0.01	51.8
Fe ₂ O ₃ (аморфн.)	0.39±0.02	0.09±0.01	50.7

Подписи к рисункам

Рис. 1. Фрагменты рентгенограмм композитов $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ с различным соотношением компонентов: Fe:Sn 9:1 (1), Fe:Sn 1:1 (2), Fe:Sn 1:9 (3), прокаленных при разных температурах.

Рис. 2. Спектр ЭПР композита $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:1): исходного (а) и обработанного в парах NO_2 при 130°C 10 мин. (б).

Рис. 3. Температурная зависимость электропроводности тонких пленок: SnO_2 (1), $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 9:1) (2), $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (3), $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:1) (4), $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:9) (5).

Рис. 4. Зависимость выходного сигнала (S) на NO_2 (1 ppm) тонкопленочных сенсоров от рабочей температуры: $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 9:1) (1), $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:9) (2), $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:1) (3).

Рис. 5. Зависимость выходного сигнала (S) на пары этанола (0,025 %) толстопленочных сенсоров от рабочей температуры: $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 9:1) (1), $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:1) (2), SnO_2 (3), $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (4), $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ (Fe:Sn 1:9) (5).

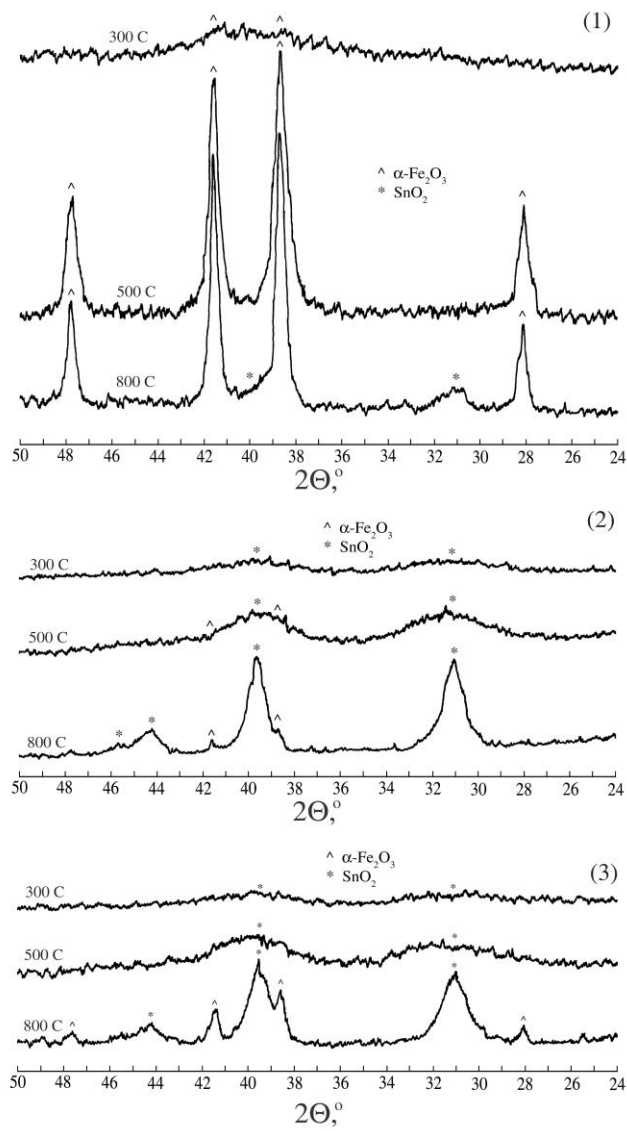


Рис 1. Ивановская и др.

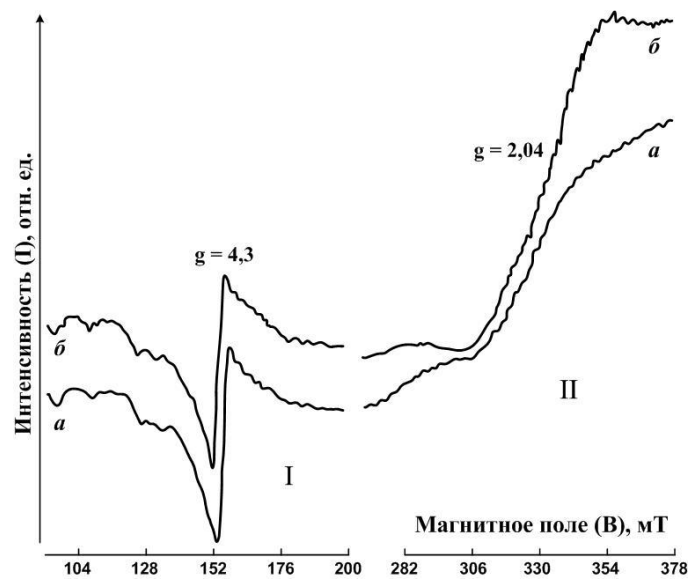


Рис. 2. Ивановская и др.

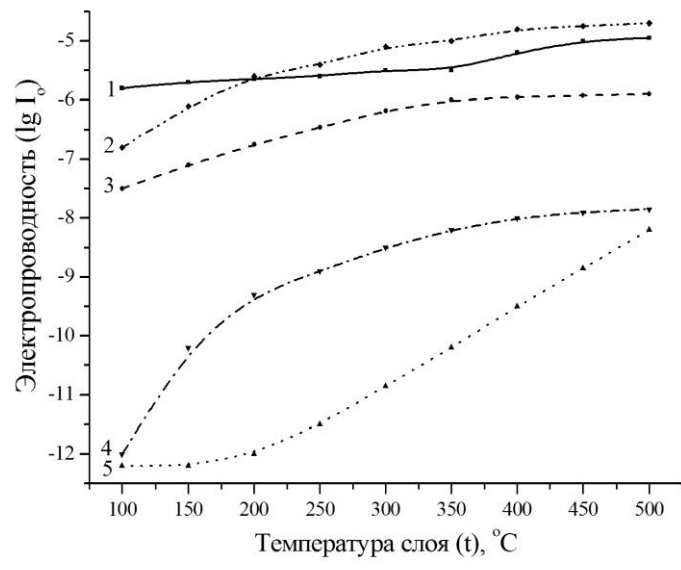


Рис. 3. Ивановская и др.

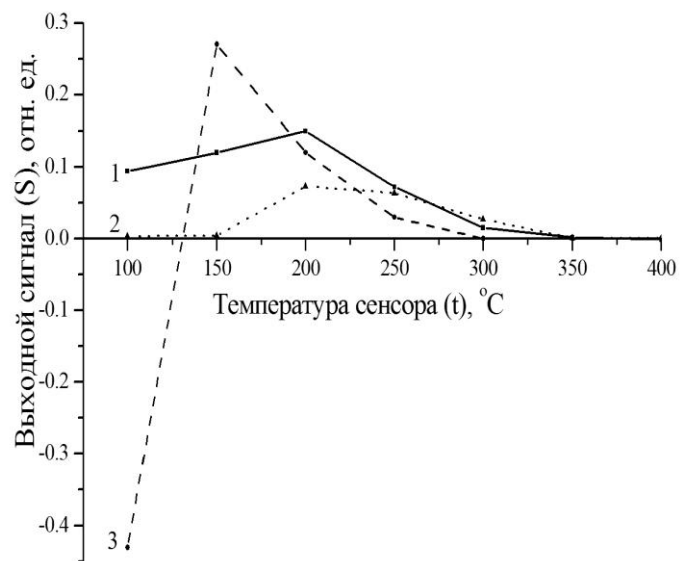


Рис. 4. Ивановская и др.

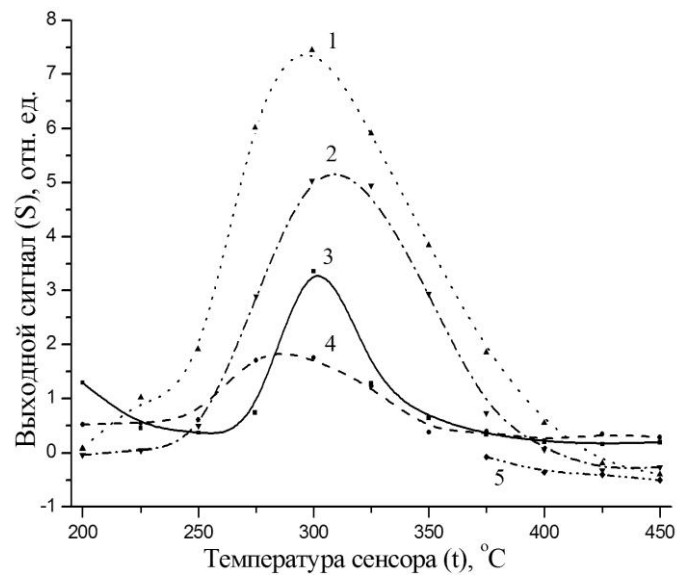


Рис. 5. Ивановская и др.

Сведения об авторах

Ивановская Мария Ивановна	Канд. хим. наук. Вед. научн. сотр.	НИИ физико-химических проблем БГУ. ул. Ленинградская 14, 220050 Минск, Беларусь	Химия твердого тела. Металлоксидные полупроводниковые сенсоры	Тел. +37517 2208106 Факс: +375172264696 ivanovskaya@bsu.by
Котиков Дмитрий Анатольевич	Аспирант	Кафедра неорганической химии БГУ ул. Ленинградская 14, 220050 Минск, Беларусь	Химия твердого тела. Металлоксидные полупроводниковые сенсоры	Тел. +37517 2208106 Факс: +375172264696 kotsikau@bsu.by
Орлик Дмитрий Ростиславович	Канд. хим. наук. Ст. научн. сотр.	НИИ физико-химических проблем БГУ. ул. Ленинградская 14, 220050 Минск, Беларусь	Химия твердого тела. Металлоксидные полупроводниковые сенсоры	Тел. +37517 2208106 Факс: +375172264696 ivanovskaya@bsu.by
Фалиа Гвидо (Faglia Guido)	Профессор, доктор философии	Национальный институт физики материалов университета г. Брешиа, ул. Валотти 9, 25133 Брешиа, Италия	Микроэлектроника, газовые сенсоры	Тел.: +39030 3715708 Fax: +39030 2091271 gfaglia@tflab.ing.unibs.it