

**Дмитриева Е.А.* , Мухамедшина Д.М., Мить К.А.,
Лебедев И.А., Грушевская Е.А.**

Физико-технический институт, Сатпаев Университет,
г. Алматы, Казахстан, *e-mail: dmitriyeva2017@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК SnO_2 , ЛЕГИРОВАННЫХ ФТОРОМ

В данной статье проведен сравнительный анализ влияния изотермического отжига (400°C) на оптические спектры пропускания, поверхностное сопротивление и адсорбционную чувствительность к парам этанола пленок оксида олова легированных ионами фтора и пленок, полученных без добавления фторирующего агента. Показано увеличение прозрачности пленок при отжиге в течение 3-х часов. Дальнейший отжиг приводит к существенному снижению прозрачности тонких пленок. Рассчитанная из спектров пропускания ширина запрещенной зоны изучаемых пленок соответствует значению ширины запрещенной зоны SnO_2 при комнатной температуре ($E_g = 3,6$ эВ). Значение ширины запрещенной зоны пленок, полученных из золя с добавлением NH_4F , с длительностью отжига менялась в пределах точности измерений. С увеличением длительности отжига пленок поверхностное сопротивление увеличивается. Пленки, полученные из золя с добавлением NH_4F , обладают меньшим поверхностным сопротивлением, чем пленки, полученные из золя без добавок. Что подтверждает наличие в составе пленок ионов фтора в качестве дополнительных источников свободных носителей заряда. Показано, что увеличение длительности отжига при 400°C до трех часов приводит к увеличению поверхностного сопротивления и уменьшению чувствительности к парам этанола. Что, возможно, связано с уменьшением мелких дефектов и разрывам связей между отдельными частицами золя. Шестичасовой отжиг при 400°C приводит к еще большему увеличению поверхностного сопротивления и увеличению чувствительности к парам этанола. Возможно, это связано с появлением микротрещин и разрушением отдельных частиц золя.

Ключевые слова: тонкие пленки SnO_2 , изотермический отжиг, легирование фтором, золь-гель метод, прозрачность, поверхностное сопротивление, адсорбционная чувствительность, пары этанола.

Dmitriyeva E.A.* , Mukhamedshina D.M., Mit K.A., Lebedev I.A., Grushevskaya E.A.

Institute of Physics and Technology, Satbaev University,
Almaty, Kazakhstan, *e-mail: dmitriyeva2017@mail.ru

The influence of isothermal annealing on the optical and electrical properties of thin SnO_2 films doped with fluorine

In this paper, a comparative analysis of the effect of isothermal annealing (400°C) on optical transmission spectra, surface resistance and adsorption sensitivity to ethanol vapor of tin oxide films doped with fluorine ions and films obtained without the addition of a fluorinating agent, is carried out. An increase in the transparency of the films is shown during annealing for 3 hours. Further annealing leads to a significant decrease in the transparency of thin films. The band gap calculated from the transmission spectra corresponds to the value of the band gap of SnO_2 at room temperature ($E_g = 3.6$ eV). The value of the gap width of films obtained from the sol with the addition of NH_4F , with the duration of annealing varied within the accuracy of the measurements. With increasing duration of film annealing, the surface resistance increases. Films obtained from the sol with the addition of NH_4F have a lower surface resis-

tance than films obtained from the sol without additives. This is confirmed by the presence of fluoride ions in the films as additional sources of free charge carriers. It is shown that an increase in the annealing time at 400°C to three hours leads to an increase in the surface resistance and a decrease in the sensitivity to ethanol vapor. This, perhaps, is associated with the reduction of small defects and the rupture of bonds between individual sol particles. Six-hour annealing at 400°C leads to an even greater increase in surface resistance and an increase in sensitivity to ethanol vapor. Perhaps this is due to the appearance of microcracks and the destruction of individual sol particles.

Key words: thin SnO₂ films, isothermal annealing, fluorine doping, sol-gel method, transparency, surface resistance, adsorption sensitivity, ethanol vapor.

Дмитриева Е.А.* , Мухамедшина Д.М., Мить К.А., Лебедев И.А., Грушевская Е.А.

Физика-техникалық институты, Сәтбаев университеті,
Алматы қ., Қазақстан, *e-mail: dmitriyeva2017@mail.ru

Изотермиялық күйдірудің фтор ендірілген SnO₂ қабықшанының оптикалық, электрикалық қасиеттеріне әсері

Бұл мақалада изотермиялық күйдіру кезіндегі (400°C) фтор иондары енгізілген қалайы тотығының оптикалық өткізу спектрі, беттік кедергі және адсорциялық сезімталдылық қасиеттеріне этанол буының әсері талданды. 3 сағат бойы күйдірген кезде қабықшаның мөлдірлігі артатындығы анықталды. Одан әрі күйдіру қабықшаның мөлдірлігін айтарлықтай төмендетеді. Зертеліп отырылған үлгінің жоспарланған өткізу спектріндегі тыйым салынған аймағының ені, бөлме температурасындағы SnO₂ тыйым салынған аймақ ені мәніне сәйкес келеді ($E_g = 3,6$ эВ). Золь әдісімен NH₄F қосу арқылы алынған қабықшаның тыйым салынған аймақ енінің мәні, қыздыру уақытын арттырған сайын беттік кедергісі артады. Золь әдісімен NH₄F қосу арқылы алынған қабықшаның, осы әдіспен бірақ қоспасыз алынған қабықшаға қарағанда беттік кедергісінің мәні төмен. Бұл қабықша құрамында фтор иондарының (еркін заряд тасымалдаушы көзі ретінде) бар екендігін растайды. 400°C температурада күйдіру ұзақтығын 3 сағатқа дейін артырғанда, беттік кедергінің артатындығын, ал этанол буына деген сезімталдылығы төмендейтіндігі анықталды. Бұл золь бөлшектерінің арасындағы байланыстың үзілуіне және кіші дефектілерге (ақаулар) байланысты болуы мүмкін. 400°C температурада 6 сағат бойы қыздыру, беттік кедергісін одан әрі арттырып, этанол буына деген сезімталдығын күшейтеді. Бұл золь бөлшектерінде микро жырықтардың және байланыстарының үзілуіне байланысты болуы мүмкін.

Түйін сөздер: SnO₂ жұқа қабықшасы, изотермиялық күйдіру, фторды ендіру, золь-гель әдісі, мөлдірлік, беттік кедергі, адсорбциялық сезімталдылық, этанол буы.

Введение

Пленки оксида олова интенсивно применяются в качестве чувствительного элемента сенсоров для определения различных газов в атмосферном воздухе [1-5]. Принцип действия этих сенсоров основан на модуляции приповерхностной области пространственного заряда и изменении электросопротивления кристаллов пленки при адсорбции молекул газов. Для того, чтобы физико-химические процессы протекали на поверхности чувствительного слоя достаточно быстро, обеспечивая время отклика на уровне нескольких секунд, сенсор разогревается до температуры 100-450 °С, что «активизирует» его поверхность. Применяются сенсоры экологическими службами, химическими предприятиями, нефтегазовой промышленностью – везде, где необходимо экспресс-определение концентраций таких газов как: озон, метан, водород, пары этилового спирта.

Пленки на основе SnO₂ применяются и в качестве ультрафиолетовых фотодетекторов

[6], пассивирующего слоя в прозрачных теплоотражающих зеркалах [7], прозрачных проводящих покрытиях [8-10]. Для проводящих покрытий важной технической характеристикой является сопротивление пленок. Достижение необходимой электропроводности возможно добавлением в пленкообразующий раствор различных примесей. В частности, для уменьшения электросопротивления и увеличения газовой чувствительности в пленки добавляют небольшие концентрации соединений, являющиеся источниками ионов фтора. Ионы фтора являются донорами свободных носителей заряда. Тонкие пленки длительное время находятся в нагретом до 400°C состоянии. Определение того, как долго пленка может сохранять свои полезные свойства в рабочем режиме – является актуальной научной и практической задачей.

В связи с вышесказанным, в данной работе была поставлена цель – провести анализ влияния изотермического отжига (400°C) на прозрачность, поверхностное сопротивление и

адсорбционную чувствительность к парам этанола пленок оксида олова легированных ионами фтора.

Эксперимент

В качестве подложек для осаждения пленок использовались заранее очищенные микроскопные слайды с размерами: длина – 7,6 см, ширина – 2,6 см, высота – 0,1 см производства Германии. Золя оксида олова готовили из раствора безводного SnCl₄ в 96% этаноле. Проводили полное осаждение оловянной кислоты добавлением концентрированного раствора гидроксида аммония (NH₄OH). Образовавшийся гель оловянной кислоты перемешивали со скоростью 160 об/мин и параллельно нагревали до 100°C, для удаления растворителей и связанной с оксидом олова воды. Для поддержания необходимой кислотности раствора по каплям через каждый час добавлялся концентрированный гидроксид аммония. Процедура длилась 11 часов. По окончании сушки был получен порошок белого цвета. Порошок оксида олова заливали этанолом из расчета получения раствора с концентрацией оксида олова 0,13 моль/л. Содержимое сосуда перемешивали со скоростью 100 об/мин без нагревания до полного перехода осадка в раствор. Процедура длилась 4 часа. В золю оксида олова добавляли фторирующий агент – фторид аммония (NH₄F). Соотношение ионов олова к ионам фтора составляло 10/4. Кристаллы фторида аммония (NH₄F) в этиловом золе диоксида олова растворяли в течение 2-х часового помешивания со скоростью 140 об/мин при параллельном нагревании – 35°C на шейкере орбитального вращения «ЛАБ-ПУ-01».

Полученные золи начинали коагулировать через 30 минут после прекращения вращения колбы, поэтому, перед нанесением каждого слоя колбу встряхивали, пока ее содержимое не стало однородным и прозрачным.

Перед нанесением пленок очищенные микроскопные слайды устанавливали в специально разработанные держатели в центрифуге. На поверхность стекла наносили слой растворителя, столик с держателями раскручивался до полного испарения спирта. После высыхания растворителя наносили первый слой пленки.

Золи наносились на всю поверхность стеклянкой подложки и раскручивались ротором центрифуги до скорости 3000 об/мин. При этом

весь избыточный раствор под действием центробежных сил удалялся с поверхности подложки. Время центрифугирования составляло от 3 до 5 сек. Подложки с оставшимся тонким слоем золя высушивались с помощью инфракрасного излучателя при температуре 80°C в течение 2-3 минут. Затем образец помещался в муфельную печь и отжигался при температуре 400°C в течение 15 минут, для закрепления слоя на подложке. После остывания наносили следующий слой. Всего было нанесено 15 слоев.

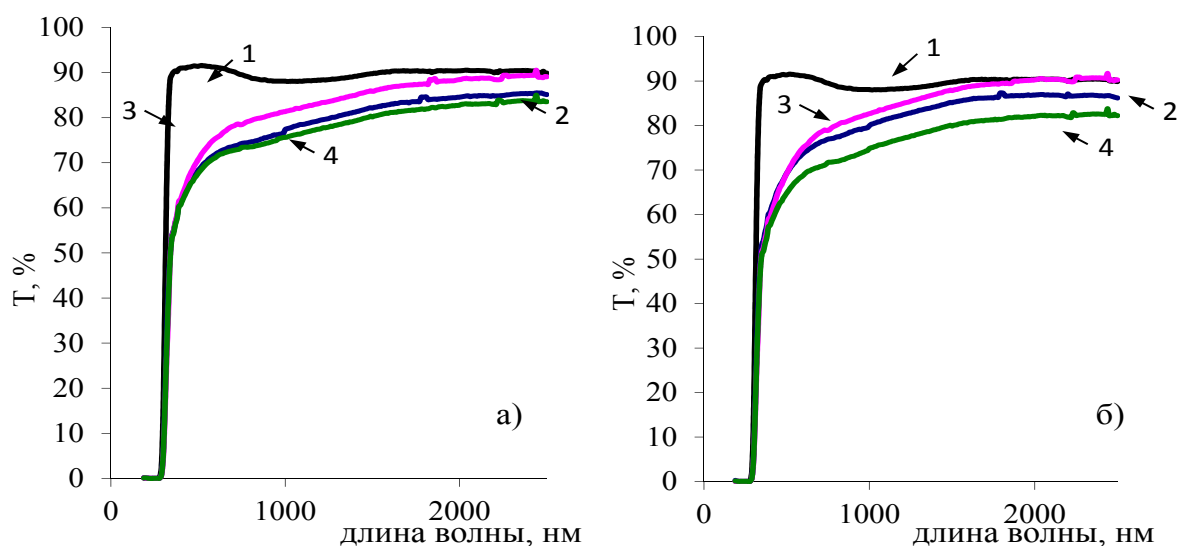
Отжиг образцов проводился в муфельной печи SNOL 6.7/1300 литовского производства при температуре 400 °C в течение 15 минут, 3 и 6 часов.

Спектры пропускания измерялись на двухлучевых спектрофотометрах СФ-256 УВИ (диапазон длин волн 190- 1200 нм) и СФ-256 (диапазон длин волн 1100-2500 нм). Поверхностное сопротивление пленок измеряли четырёхзондовым методом. Чувствительность к парам этанола определяли на экспериментальной установке, позволяющей проводить измерения в диапазоне температур от комнатной до 300°C.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены спектры пропускания тонких пленок SnO₂ после изотермического отжига.

Из рисунка 1 видно, что пленки, полученные из золя без добавок и пленки, полученные с добавлением NH₄F после отжига 400°C в течение 15 минут, обладают прозрачностью 70-80% в диапазоне длин волн 550-2300 нм. Отжиг при 400°C в течение 3 часов приводит к увеличению прозрачности в этом же диапазоне длин волн на 5-7%. Увеличение прозрачности может быть связано с уменьшением дефектов структуры. Дальнейший отжиг до 6 часов приводит к уменьшению прозрачности пленок, полученных из золя без добавок, до тех же значений, что и при отжиге 400°C 15 минут (Рисунок 1а кривая 2 и 4). Отжиг пленок, полученных из золя с добавлением NH₄F, при 400°C до 6 часов приводит к уменьшению прозрачности в диапазоне длин волн 550-2300 нм до 66-82% (Рисунок 1б, кривая 4). Уменьшение прозрачности пленок с увеличением длительности отжига до 6 часов может быть связано с увеличением неоднородности пленок по структуре, появлением микротрещины и других дефектов.



1 – стеклянная подложка; 2 – пленка после 15 минут отжига;
 3 – пленка после 3 часов отжига; 4 – пленка после 6 часов отжига.
 а) спектры пропускания пленок SnO₂, полученных из золя без добавок.
 б) спектры пропускания пленок SnO₂, полученных из золя с добавлением NH₄F.

Рисунок 1 – Спектры пропускания тонких пленок SnO₂

В таблице 1 приведены значения ширины запрещенной зоны, рассчитанной из оптических спектров.

Из таблицы 1 видно, что ширина запрещенной зоны изучаемых пленок соответствует значению ширины запрещенной зоны SnO₂ при комнатной температуре ($E_g = 3,6$ эВ). Значение ширины запрещенной зоны пленок, полученных из золя с добавлением NH₄F, с длительностью отжига менялась в пределах точности измерений. Изменения энергии запрещенной зоны может быть вызвана увеличением плотности носи-

телей заряда за счет увеличения размера зерен [11]. Отклонения значений ширины запрещенной зоны пленок, полученных из золя без добавок, с увеличением длительности отжига могут быть связаны с нестехиометричностью по кислороду [10].

Поверхностное сопротивление тонких пленок SnO₂ определялось по 5 измерениям на разных участках при доверительной вероятности $P = 0,95$ и коэффициенте Стьюдента $t_{0,95,4} = 2,776$. Результаты измерения представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Значения ширины запрещенной зоны, рассчитанной из оптических спектров

Состав пленкообразующего золя	Ширина запрещенной зоны		
	15 минут отжига	3 часа отжига	6 часов отжига
Золь без добавок	3,61эВ	3,62эВ	3,61эВ
Золь с добавлением NH ₄ F	3,60эВ	3,60эВ	3,60эВ

Таблица 2 – Поверхностное сопротивление пленок после изотермического отжига

Состав пленкообразующего золя	Поверхностное сопротивление пленок после отжига при 400 °С		
	15 минут, кОм·см	3 часа, кОм·см	6 часов, кОм·см
Золь без добавок	78,8±21,2	355,3±25,9	970,6±84,8
Золь с добавлением NH ₄ F	69,4±8,2	143,8±18,2	897,9±118,3

Как видно из таблицы 2, пленки, полученные из золя без добавок, после отжига 15 минут при 400°C обладают поверхностным сопротивлением $78,8 \pm 21,2 \text{ кОм} \cdot \text{см}$. Точность измерения составила 27%, что указывает на высокую неоднородность поверхностного сопротивления по поверхности пленки. Уменьшение прозрачности и низкие сопротивления пленок, являются необходимыми требованиями для их применения в качестве прозрачных электродов в фотогальванике [12-15]. Увеличение длительности отжига до 3 часов приводит к значительному увеличению поверхностного сопротивления, однако точность измерений увеличивается до 7%. Это может быть вызвано разрушением связей между отдельными частицами золя, что и привело к увеличению сопротивления и снижению неоднородности пленки. Дальнейший отжиг до 6 часов приводит к еще большему увеличению поверхностного сопротивления, без значительного изменения в точности измерений. Вероятно, это связано с разрушением частиц золя до отдельных кристаллитов SnO₂.

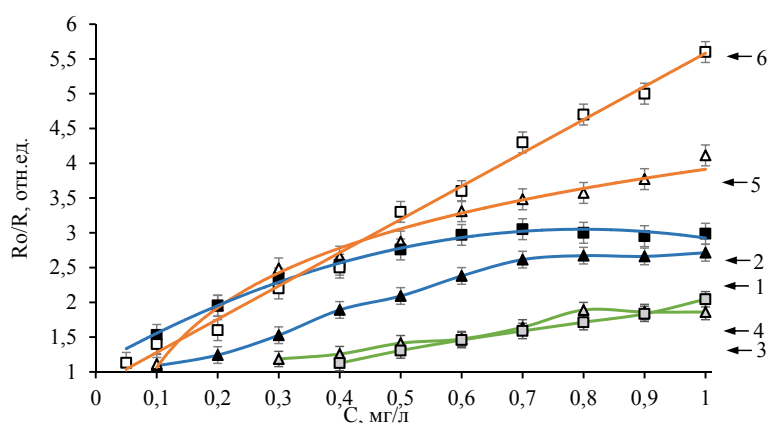
Пленки, полученные из золя с добавлением NH₄F, обладают меньшим поверхностным сопротивлением, чем пленки, полученные из золя без добавок (таблица 2). Что подтверждает наличие в составе пленок ионов фтора в качестве дополнительных источников свободных носителей заряда [16-19]. Увеличение длительности отжига приводит к увеличению поверхностного сопротивления, как и у пленок, полученных из золя без добавок. Следует отметить, что точность из-

мерений мало меняется с длительностью отжига и составляет 12-13%.

На рисунке 2 представлена зависимость чувствительности пленок от концентрации паров этанола.

Из рисунка 2 видно, что пленки после отжига 400°C 15 минут обладают чувствительностью к парам этанола в пределах концентраций 0,1-0,7 мг/л. Дальнейшее увеличение концентрации этанола не приводит к увеличению высвобождающихся электронов и чувствительность меняется в пределах точности измерений (рисунок 2 кривая 1 и 2). То есть, все, находящиеся на поверхности пленки центры хемо-сорбированного кислорода уже участвуют во взаимодействии с этанолом [20]. Причем пленка, полученная из золя с добавлением NH₄F, обладает большей чувствительностью к парам этанола, чем пленка, полученная из золя без добавок. После 3-х часов отжига при 400°C чувствительность на пары этанола уменьшается (рисунок 2, кривая 3 и 4). Следует отметить, что обе пленки проявляют одинаковую (в пределах точности измерений) чувствительность на пары этанола.

Это косвенно подтверждает предположение о разрушении мелких дефектов на поверхности которых и происходили реакции адсорбции-десорбции. Изотермический отжиг также приводит и к увеличению размеров кристаллитов [21-25], за счет разрушения мелких дефектов. Увеличение длительности отжига до 6 часов приводит к увеличению чувствительности (рисунок 2, кривая 5 и 6).



1 – чувствительность пленок, полученных из золя без добавок после отжига 400°C 15 минут; 2 – чувствительность пленок, полученных из золя с добавлением NH₄F после отжига 400°C 15 минут; 3 – чувствительность пленок, полученных из золя без добавок после отжига 400°C 3 часа; 4 – чувствительность пленок, полученных из золя с добавлением NH₄F после отжига 400°C 3 часа; 5 – чувствительность пленок, полученных из золя без добавок после отжига 400°C 6 часов; 6 – чувствительность пленок, полученных из золя с добавлением NH₄F после отжига 400°C 6 часов.

Рисунок 2 – Чувствительность пленок SnO₂ от концентрации паров этанола

Предполагаемое выше образование микротрещин и частичное разрушение частиц золя, может привести к увеличению удельной поверхности на которой адсорбируется кислород, забирая на себя электроны из зоны проводимости и увеличивая сопротивление пленок. Увеличение хемо-сорбированного кислорода может являться причиной увеличения чувствительности к парам этанола.

Заключение

Проведен сравнительный анализ влияния изотермического отжига (400°C) на оптические спектры пропускания, поверхностное сопротивление и адсорбционную чувствительность к парам этанола пленок оксида олова легированных ионами фтора и пленок, полученных без добавления фторирующего агента. Показано, что увеличение длительности отжига при 400°C до трех

часов приводит к увеличению прозрачности пленок, увеличению поверхностного сопротивления и уменьшению чувствительности к парам этанола. Что, возможно, связано с уменьшением мелких дефектов и разрывам связей между отдельными частицами золя.

Шестичасовой отжиг при 400°C приводит к уменьшению прозрачности пленок SnO₂, еще большему увеличению поверхностного сопротивления и увеличению чувствительности к парам этанола. Предположительно, это связано с появлением микротрещин и разрушением отдельных частиц золя.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках проекта AP05134263/ГФ и BR05236404/ПЦФ

Литература

- 1 Пономарева А.А. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург, 2013. – 18 с.
- 2 Kadhim I.H., Abu Hassan H., and Abdullah Q.N. Hydrogen Gas Sensor Based on Nanocrystalline SnO₂ Thin Film Grown on Bare Si Substrates // *Nano-Micro Lett.* – 2016. Vol. 8(1). – P.20-28.
- 3 Fedorenko G., Oleksenko L., Maksymovych N., Skolyar G., and Ripko O. Semiconductor Gas Sensors Based on Pd/SnO₂ Nanomaterials for Methane Detection in Air // *Nanoscale Research Letters.* – 2017. – Vol. 2. – P.329.
- 4 Sokovykh E.V., Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., and Matushko I.P. Influence of Conditions of Pd/SnO₂ Nanomaterial Formation on Properties of Hydrogen Sensors // *Nanoscale Research Letters.* – 2017. – Vol. 12. – P.383.
- 5 Korotcenkov G., Brinzari V. and Cho B.K. In₂O₃- and SnO₂-Based Thin Film Ozone Sensors: Fundamentals // *Journal of Sensors.* – 2016. ID 3816094 (31).
- 6 Zhao J.L., Deng R., Qin J.M., Song J., Jiang D.Y., Yao, B., and Li Y.F. Photoresponse enhancement in SnO₂ -based ultraviolet photodetectors via coupling with surface plasmons of Ag particles // *Journal of alloys and compounds.* – 2018. – Vol. 748. – P.398-403.
- 7 Dalapati G.K., Kushwaha A.K., Sharma M., Suresh V., Shannigrahi S., Zhuk S., and Masudy-Panah S. Transparent Heat Regulating (THR) Materials and Coatings for Energy Saving Window Applications: Impact of Materials Design, Micro-Structural, and Interface Quality on the THR Performance // *Progress in materials science.* – 2018. – Vol. 95. – P.42-131.
- 8 Kondrashin V.I. Determination of SnO₂ thin optically transparent films' thickness by the envelope method // *Engineering sciences. Electronics, measuring equipment and radio engineering.* – 2016. – Vol. 2(38). – P.93–101.
- 9 Kumar K.D.A., Valanarasu S., Jeyadheepan K., Kim H.S., and Vikraman D. Evaluation of the physical, optical, and electrical properties of SnO₂: F thin films prepared by nebulized spray pyrolysis for optoelectronics // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* – 2018. — Vol. 29(5). – P.3648–3656.
- 10 Белоусов С.А., Носов А.А., Меньшикова Т.Г., Рембеза С.И. Электрофизические свойства металлооксидных пленок SnO₂, изготовленных по золь-гель технологии // *Вестник Воронежского Государственного технического университета.* – 2016. – С.22-25.
- 11 Kabir A., Boulainine D., Bouanane I., Schmerber G., and Boudjema B. Physical properties of SnO₂ thin films prepared by isothermal oxidation of vacuum evaporated Sn // *Journal of materials science-materials in electronics.* – 2017. – Vol. 28(3). – P.2481-2486.
- 12 Fukumoto M., Nakao S., Hirose Y., and Hasegawa T. Fabrication of textured SnO₂ transparent conductive films using self-assembled Sn nanospheres // *Japanese journal of applied physics.* – 2018. – Vol. 57(6). – P.060307.
- 13 Mukhamedshina D.M., Mit' A., Beisenkhanov N.B., Dmitriyeva A., and Valitova I.V. Influence of plasma treatments on the microstructure and electrophysical properties of SnO_x thin films synthesized by magnetron sputtering and sol-gel technique // *J Mater Sci: Mater Electron.* – 2008. – Vol.19. – P.382-387.

- 14 Mukashev B.N., Aimagambetov A.B., Mukhamedshina D.M., Beisenkhanov N.B., Mit' K.A., Valitova I.V., and Dmitrieva E.A. Study of structural, optical and electrical properties of ZnO and SnO₂ thin films // *Superlattices and microstructures*. – 2007. – Vol.42(1). – P.103-109.
- 15 Kumar V., Singh K., Jain M., Manju, Kumar A., Sharma J., Vij A. and Thakur A. // *Applied surface science*, 552-558 (2018). doi: 10.1016/j.apsusc.2018.03.063
- 16 Esmaeeli A., Ghaffarinejad A., Zahedi A., and Vahidi O. Copper oxide-polyaniline nanofiber modified fluorine doped tin oxide (FTO) electrode as non-enzymatic glucose sensor // *Sensors and Actuators B-Chemical*. – 2018. – March. – P.294-301.
- 17 Rodrigues S.P., Evaristo M., Carvalho S., and Cavaleir A. Fluorine-carbon doping of WS₂-based coatings deposited by reactive magnetron sputtering for low friction purposes // *Applied surface science*. – 2018. – Vol.445. – P.575-585.
- 18 Riapanitra A., Asakura Y., Cao W.B., Noda Y., and Yin S. Supercritical temperature synthesis of fluorine-doped VO₂(M) nanoparticle with improved thermochromic property // *Nanotechnology*. – 2018. – Vol. 29(24).
- 19 Anitha M., Saravanakumar K., Anitha N., and Amalraj L. Influence of a novel co-doping (Zn+F) on the physical properties of nano structured (111) oriented CdO thin films applicable for window layer of solar cell // *Applied surface science*. – 2018. – Vol.443. – P.55-67.
- 20 Wei J., Li X., Han Y., Xu J., Jin H., Jin D., Peng X., Hong B., Li J., Yang Y., Ge H. and Wang X. Highly improved ethanol gas-sensing performance of mesoporous nickel oxides nanowires with the stannum donor doping // *Nanotechnology*. – 2018. – Vol. 29 (24). – P.245501.
- 21 Miguel F.L., Mueller R., Mathur S., and Muecklich F. On the thermal stability of electrodeposited Ni-matrix-nanocomposite films reinforced with Ag-coated SnO₂ nanowires // *Surface & coatings technology*. – 2016. – Vol.287. – P.93-102.
- 22 Fu B., Han J., Guo S.Q., Wang Z., Zhang P., Pan Z.J., and Xu Q. Room-temperature and high-temperature magnetic permeability of Co-doped nanocrystalline alloys // *Rare metals*. – 2018. – Vol.37(10). – P.427-432.
- 23 Srivastava A., Tiwari S.N., Alvi M.A., and Khan S.A. Phase change studies in Se₈₅In_{15-x}N_x chalcogenide thin films // *Journal of applied physics*. – 2018. – Vol.123(12). – P.125105.
- 24 Ho C.E., Hsieh W.Z., Lee P.T., Huang Y.H., and Kuo T.T. High-temperature stability of Au/Pd/Cu and Au/Pd(P)/Cu surface finishes // *Applied surface science*. – 2018. – Vol.434. – P.1353-1360.
- 25 Kozyukhin S., Vorobyov Yu., Lazarenko P., and Presniakov M. Isothermal and CW laser crystallization of amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films // *Journal of non-crystalline solids*. – 2018. – Vol. 480(15). – P.51-56.

References

- 1 A.A. Ponomareva Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk. (St. Petersburg, 2013), 18 p. (in Russ).
- 2 I.H. Kadhim, H. Abu Hassan, and Q.N. Abdullah, *Nano-Micro Lett.*, 8(1), 20–28 (2016). doi 10.1007/s40820-015-0057-1
- 3 G. Fedorenko, L. Oleksenko, N. Maksymovych, G. Skolyar, and O. Ripko, *Nanoscale Research Letters*, 12:329 (2017), doi: 10.1186/s11671-017-2102-0
- 4 E.V. Sokovykh, L.P. Oleksenko, N.P. Maksymovych, and I.P. Matushko, *Nanoscale Research Letters*, 12:383 (2017). doi: 10.1186/s11671-017-2152-3
- 5 G. Korotcenkov, V. Brinzari, and B.K. Cho, *Journal of Sensors*, 31, 3816094 (2016).
- 6 J.L. Zhao, R. Deng, J.M. Qin, J. Song, D.Y. Jiang, B. Yao, and Y.F. Li, *Journal of alloys and compounds*, 748, 398-403 (2018). doi: 10.1016/j.jallcom.2018.03.180
- 7 G.K. Dalapati, A.K. Kushwaha, M. Sharma, V. Suresh, S. Shannigrahi, S. Zhuk, and S. Masudy-Panah, *Progress in materials science*, 95, 42-131 (2018). doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.02.007
- 8 V.I. Kondrashin, *Engineering sciences. Electronics, measuring equipment and radio engineering*, 2(38), 93–101 (2016). doi: 10.21685/2072-3059-2016-2-8
- 9 K.D.A. Kumar, S. Valanarasu, K. Jeyadheepan, H.S. Kim, and D. Vikraman, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(5), 3648–3656 (2018). doi:10.1007/s10854-017-8295-2
- 10 S.A. Belousov, A.A. Nosov, T.G. Men'shikova, and S.I. Rembeza, *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, 22-25 (2016). (in Russ)
- 11 A. Kabir, D. Boulainine, I. Bouanane, G. Schmerber, and B. Boudjema, *Journal of materials science-materials in electronics*, 28(3), 2481-2486 (2017). doi: 10.1007/s10854-016-5821-6
- 12 M. Fukumoto, S. Nakao, Y. Hirose, and T. Hasegawa, *Japanese journal of applied physics*, 57(6), 060307 (2018). doi: 10.7567/JJAP.57.060307
- 13 D.M. Mukhamedshina, A. Mit', N.B. Beisenkhanov, A. Dmitriyeva, and I.V. Valitova, *J Mater Sci: Mater Electron*, 19, 382-387 (2008). doi: 10.1007/s10854-008-9695-0
- 14 B.N. Mukashev, A.B. Aimagambetov, D.M. Mukhamedshina, N.B. Beisenkhanov, K.A. Mit', I.V. Valitova, and E.A. Dmitrieva, *Superlattices and microstructures*, 42(1), 103-109 (2007). doi: 10.1016/j.spmi.2007.04.057
- 15 V. Kumar, K. Singh, M. Jain, Manju, A. Kumar, J. Sharma, A. Vij, and A. Thakur, *Applied surface science*, 552-558 (2018). doi: 10.1016/j.apsusc.2018.03.063

- 16 A. Esmaeeli, A. Ghaffarinejad, A. Zahedi, and O. Vahidi, *Sensors and Actuators B-Chemical*, March, 294-301 (2018). doi: 10.1016/j.snb.2018.03.132
- 17 S.P. Rodrigues, M. Evaristo, S. Carvalho, A. and Cavaleiro, *Applied surface science*, 445, 575-585 (2018). doi: 10.1016/j.apsusc.2018.03.113
- 18 A. Riapanitra, Y. Asakura, W.B. Cao, Y. Noda, and S. Yin, *Nanotechnology*, 29(24) (2018) doi: 10.1088/1361-6528/aab752
- 19 M. Anitha, K. Saravanakumar, N. Anitha, and L. Amalraj, *Applied surface science*, 443, 55-67 (2018). doi: 10.1016/j.apsusc.2018.02.231
- 20 J. Wei, X. Li, Y. Han, J. Xu, H. Jin, D. Jin, X. Peng, B. Hong, J. Li, Y. Yang, H. Ge, and X. Wang, *Nanotechnology*, 29 (24), 245501 (2018). doi: 10.1088/1361-6528/aab9d8
- 21 F.L. Miguel, R. Mueller, S. Mathur, and F. Muecklich, *Surface & coatings technology*, 287, 93-102 (2016). doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.12.085
- 22 B. Fu, J. Han, S.Q. Guo, Z. Wang, P. Zhang, Z.I. Pan, and Q. Xu, *Rare metals*, 37(10), 427-432 (2018). doi: 10.1007/s12598-018-1037-7
- 23 A. Srivastava, S.N. Tiwari, M.A. Alvi, and S.A. Khan, *Journal of applied physics*, 123(12), 125105 (2018). doi: 10.1063/1.5018777
- 24 C. Ho, E. Hsieh, W.Z. Lee, P.T. Huang, Y.H. and T.T. Kuo, *Applied surface science*, 434, 1353-1360 (2018). doi: 10.1016/j.apsusc.2017.11.247
- 25 S. Kozyukhin, Yu. Vorobyov, P. Lazarenko, and M. Presniakov, *Journal of non-crystalline solids*, 480(15), 51-56 (2018). doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.07.014.