

PACS numbers: 07.07.Df, 68.55.-a, 73.61.-r, 81.05.Je, 82.47.Rs, 83.80.Hj, 85.40.Xx

Свойства толстых плёнок на основе SnO_2 при использовании контактов, изготовленных из Ni_3B -паст

А. Г. Гончар, В. Е. Шелудько, В. В. Кременицкий*, Н. И. Симан,
Л. И. Фиялка

*Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,
ул. Академика Кржижановского, 3,
03142 Киев, Украина*
**Технический центр НАН Украины,
ул. Покровская, 13,
04070 Киев, Украина*

Исследованы свойства толстых плёнок на основе порошков $\text{Sn}_{0,97}\text{Sb}_{0,03}\text{O}_2$, SnO_2 и их смесей, нанесённых на контакты, изготовленные из пасты на основе порошка Ni_3B . Использовались методы рентгенофазового и рентгеноспектрального анализов, а также электронная микроскопия. Исследованы вольт-амперные характеристики, концентрационные и температурные зависимости электросопротивления плёнок. Установлено, что использование контактов, изготовленных из Ni_3B -паст, оказывает влияние на вид температурных зависимостей электросопротивления плёнок.

Ключевые слова: толстая плёнка, контакты, диоксид олова, температурная зависимость электросопротивления.

Досліджено властивості товстих плівок на основі порошоків $\text{Sn}_{0,97}\text{Sb}_{0,03}\text{O}_2$, SnO_2 та їх сумішей, нанесених на контакти, виготовлені з пасту на основі порошку Ni_3B . Використовувалися методи рентгенофазової та рентгеноспектральної аналіз, а також електронна мікроскопія. Досліджено вольт-

Corresponding author: Volodymyr Evgenovych Sheludko
E-mail: dep65@ipms.kiev.ua

*I. M. Frantsevich Institute for Problems in Materials Science, N.A.S. of Ukraine,
3, Academician Krzhizhanovsky Str., UA-03142 Kyiv, Ukraine*
**Technical Centre, N.A.S. of Ukraine, 13 Pokrovs'ka Str., 04070 Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: A. G. Gonchar, V. E. Sheludko, V. V. Kremenitsky, M. I. Siman, and L. I. Fiyalka, Properties of the SnO_2 -Based Thick Films When Using the Contact Pads Fabricated from Ni_3B -Paste, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 2: 177–188 (2017) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.39.02.0177.

амперні характеристики, концентраційні та температурні залежності електроопору плівок. Встановлено, що використання контактів, виготовлених з Ni_3B -паст, впливає на вигляд температурних залежностей електроопору плівок.

Ключові слова: товста плівка, контакти, діоксид олова, температурна залежність електроопору.

Properties of thick films based on the $\text{Sn}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}\text{O}_2$ and SnO_2 powders, and their mixtures deposited on contact pads fabricated from Ni_3B -powder-based paste are investigated. The X-ray phase and X-ray spectrum analyses as well as electron microscopy are used. Volt-ampere characteristics, concentration and temperature dependences of electrical resistivity of films are determined. As revealed, the use of the contact pads fabricated from Ni_3B -pastes influences on the form of electrical-resistivity–temperature dependences of films.

Key words: thick film, contact pads, tin dioxide, temperature dependence of electrical resistivity.

(Получено 22 июня 2016 г.; окончат. вариант — 25 января 2017 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе диоксида олова нашли широкое применение во многих отраслях промышленности: электротехнике, электронике, электрохимии, биотехнологии и др. [1–3]. Легированный и нелегированный диоксид олова в форме спрессованных таблеток, толстых и тонких плёнок является одним из наиболее используемых материалов для изготовления газовых сенсоров, принцип действия которых основан на изменении электросопротивления под воздействием окружающей среды. Поскольку функционирование электротехнических материалов на основе SnO_2 связано с протеканием через них электрического тока, то это предусматривает важную роль токоподводящих контактов. Одним из основных требований, предъявляемых к контактам, является омичность свойств — контакты должны характеризоваться линейной симметричной вольт-амперной характеристикой и обладать малым электрическим сопротивлением. Стоит отметить, что роль контактов не всегда сводится лишь к обеспечению беспрепятственного протекания тока. Например, материал контактов к полупроводниковым структурам, используемым в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров, может принимать участие в процессах адсорбции/десорбции газов и, таким образом, оказывать влияние не только на чувствительность сенсора, но и на его селективность по отношению к детектируемым средам [2].

В качестве материалов контактов для толстых и тонких плёнок

на основе SnO₂ наиболее часто используются Au, Ag, Pt и сплавы Au/Pt, Ag/Pd. Хотя влиянию данных контактных материалов на сенсорные свойства плёнок SnO₂ посвящён ряд работ [2, 3], единой точки зрения по поводу роли и механизма такого влияния в настоящее время нет.

Одним из материалов, нашедших применение в толстоплёночной микроэлектронике для изготовления токоподводящих контактов, является борид никеля — Ni₃B [4, 5]. Несмотря на обширную патентную литературу, проводниковый материал на основе данного борида остаётся малоизученным, а информация по его использованию с материалами на основе диоксида олова среди литературных данных не обнаружена. Проведённые нами ранее исследования [6] показали, что термообработка Ni₃B-паст при температурах превышающих 600°C приводит к образованию плёнок, основным структурным элементом которых являются нанодисперсные частицы Ni различной величины. Цель настоящей работы — исследовать свойства толстых плёнок на основе порошков SnO₂, нанесённых на контакты, изготовленные из токопроводящих Ni₃B-паст.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Изготовление контактов и толстых плёнок на основе диоксида олова осуществлялось методом трафаретной печати — пасты, представляющие собой суспензию порошков в органическом связующем, через сетчатый трафарет наносились на подложку, после чего проходили термообработку. В качестве подложки использовалась алюмооксидная керамика (94,4% масс. Al₂O₃), как органическое связующее — раствор этилцеллюлозы в терпинеоле.

При изготовлении контактов применялась паста на основе порошка Ni₃B (средний диаметр частиц $d = 3-5$ мкм), в состав которой также входило свинцовоборосиликатное стекло марки С82-3 в количестве 10% масс. После нанесения на подложку контактная паста проходила термообработку при температуре 800°C.

При изготовлении толстоплёночных образцов использовались пасты 8 составов. На подложки с прошедшими термообработку контактами наносились пасты на основе:

– порошка SnO₂ ($d = 1-3$ мкм, производство НТЦ «Реактивэлектрон»);

– порошка диоксида олова, легированного сурьмой Sn_{0,97}Sb_{0,03}O₂ — NanoTek® ($d = 28$ нм, производство AlfaAesar, США);

– порошков смешанного состава: $x\text{SnO}_2 + (100 - x)\text{Sn}_{0,97}\text{Sb}_{0,03}\text{O}_2$, где $x = 30, 60, 80, 90, 94, 97\%$ масс.

Термообработка толстоплёночных образцов осуществлялась на воздухе при температурах 600, 700, 750 и 800°C в конвейерной печи ПЭК-8. После основной термообработки образцы проходили стаби-

лизирующий отжиг при температуре 400°C.

Толщина плёночных образцов контролировалась интерферометром «Микрон-Альфа».

Рентгенофазовый анализ осуществлялся на установке ДРОН-3,0 в CuK_α -фильтрованном излучении. Идентификация фаз осуществлялась по картотеке JCPDS. Рентгеноспектральный микроанализ проводился на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8200 фирмы JEOL.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и электросопротивление образцов измеряли 2-х и 4-х зондовым методами с применением цифрового мультиметра GW Instek GDM-8246.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рентгенофазового и рентгеноспектрального анализа свидетельствуют, что материал прошедшего термообработку контакта, в основном, представляет собой фазу никеля, химическое взаимодействие между материалами плёнки и контакта отсутствует. На рисунке 1 приведена дифрактограмма участка толстой плёнки на основе смеси порошков (содержание порошка SnO_2 в смеси $x = 80\%$ масс.), находящегося над контактом, изготовленным из Ni_3V -пасты. Температура термообработки образца — 700°C. Как следует из рисунка, основные линии на дифрактограмме принадлежат фазам диоксида олова и никеля, фиксируются пики фаз, принадлежащих подложке. Присутствуют слабые линии, соответствующие незначительному количеству остаточного Ni_3V в контактном слое.

На рисунке 2 изображены микроструктуры поверхности плёнок и результат рентгеноспектрального микроанализа поверхности контакта. Исследуемые в настоящей работе плёнки имеют толщину 20–25 мкм с порами субмикронного и микронного размеров. Стоит отметить, что порошки диоксида олова плохо спекаются даже при температурах, близких к температуре сублимации ($\cong 1700^\circ\text{C}$), а добавки сурьмы ухудшают их спекаемость. В результате выдержки при температурах термообработки, используемых в настоящей работе, из порошков исходных материалов образуется ансамбль слабо спечённых частиц. Механическая прочность исследуемых плёнок обеспечивалась, среди прочего, использованием при изготовлении паст смесей порошков различной дисперсности.

Исследование ВАХ образцов проводилось при температурах 25, 100, 200, 300 и 400°C на воздухе и в вакууме. Результаты показали что, для всех исследованных в настоящей работе составов плёночных композиций и температур термообработки, ВАХ симметричные и линейные при измерениях как на воздухе, так и в вакууме, что свидетельствует об отсутствии барьера на границе контакт–

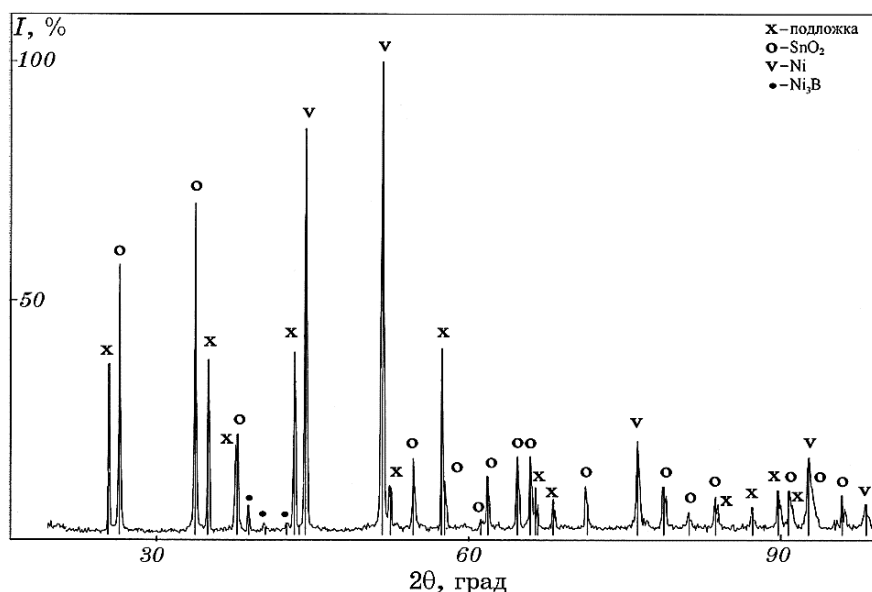


Рис. 1. Дифрактограмма толстоплёночного образца на основе смеси порошков (содержание порошка SnO₂ в смеси $x = 80\%$ масс.), нанесённого на контакт, изготовленный из Ni₃B-пасты.

Fig. 1. XRD-patterns of thick-film sample on the base of powders' mixture (the content of SnO₂ powder in the mixture— $x = 80\%$ wt.) deposited on the contact pad fabricated from Ni₃B-paste.

полупроводниковый слой.

Удельное поверхностное электросопротивление контактных площадок составило 0,03 Ом/квadrat, что сопоставимо по величине с сопротивлением площадок, изготовленных из благородных металлов. Важно отметить, что величина электросопротивления исследуемых в работе плёночных образцов практически не отличалась от величин, измеренных для аналогичных по составу плёнок, нанесённых на контакты, изготовленные из Ag/Pd-пасты. Удельное поверхностное электросопротивление плёночных образцов на основе порошка Sn_{0,97}Sb_{0,03}O₂ в зависимости от температуры термообработки составило величины в диапазоне от 1 до 5 кОм/квadrat, в то время как сопротивление образцов на основе чистого порошка SnO₂ при комнатной температуре превышало 10¹² Ом. Столь значительная разница в величинах электросопротивления образцов связана со свойствами исходных порошков Sn_{0,97}Sb_{0,03}O₂ и SnO₂, используемых при изготовлении паст. Чистый диоксид олова — широкозонный полупроводник (ширина запрещённой зоны 3,6 эВ) *n*-типа, обладающий низкой проводимостью. Сурьма, замещая атомы олова в решётке SnO₂, образует примесную зону, которая в моно-

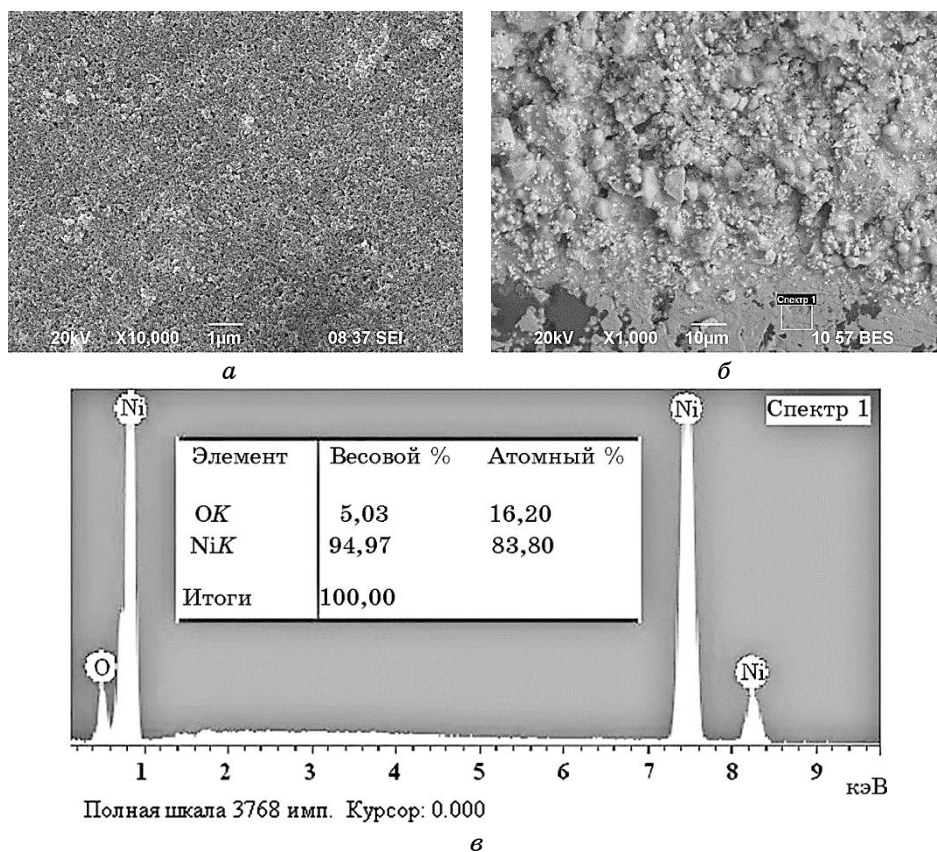


Рис. 2. Микроструктура поверхности плёнок: на основе порошка $\text{Sn}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}\text{O}_2$ (а), на основе смеси порошков (содержание SnO_2 $x = 20\%$ масс.) в области контакта (контакт снизу) (б); энергодисперсионные спектры и элементный состав поверхности контакта (в).

Fig. 2. The microstructure of films' surface: on the base of $\text{Sn}_{0.97}\text{Sb}_{0.03}\text{O}_2$ powder (a), on the base of powders' mixture (content of SnO_2 $x = 20\%$ wt.) in the contact pad area (below) (b); EDS-spectra and element composition of the contact pad surface (c).

кристаллах твёрдых растворов $\text{Sn}_{1-\delta}\text{Sb}_\delta\text{O}_2$ при $\delta = 1,1 \cdot 10^{-3}$ сливается с дном зоны проводимости [7]. Легирование сурьмой в пределах нескольких атомарных процентов увеличивает проводимость SnO_2 на порядки.

Поскольку в работе при изготовлении толстоплёночных образцов использовались смеси порошков, то представляют интерес концентрационные зависимости свойств. На рисунке 3 приведена зависимость удельного поверхностного электросопротивления от содержания порошка SnO_2 в составе толстоплёночной композиции для

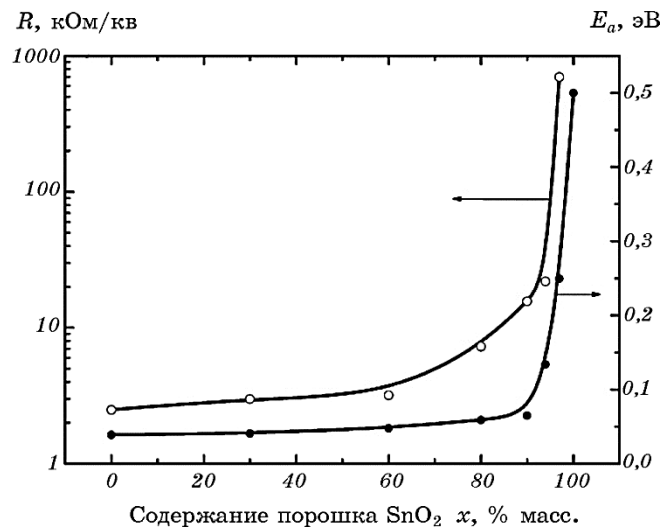


Рис. 3. Зависимости удельного поверхностного электросопротивления (R) и энергии активации (E_a) электропроводности плёнок от содержания порошка SnO₂ в составе плёночной композиции.

Fig. 3. The dependences of the specific surface electrical resistivity (R) and activation energy (E_a) of electroconductivity of films on the content of SnO₂ powder in the film composition.

плёнок, прошедших термообработку на воздухе при 700°C. Для образцов, прошедших термообработку при других температурах, зависимости аналогичные.

Приведённые зависимости свидетельствуют о том, что электросопротивление плёнок сравнительно слабо растёт по мере увеличения содержания порошка SnO₂ в составе композиции до 94% масс., а при дальнейшем увеличении x рост сопротивления резко усиливается. Такое поведение характерно для двухфазных материалов, в состав которых входят диэлектрик и проводник, либо, как в нашем случае, фазы с резко отличающимися величинами электропроводности. Изображённая на рис. 3 зависимость иллюстрирует, что в образцах на основе смеси порошков с концентрацией SnO₂ меньше $x = 94\%$ масс. проводимость осуществляется по токопроводящим цепочкам контактирующих наночастиц твёрдого раствора Sn_{0,97}Sb_{0,03}O₂. Увеличение концентрации SnO₂ выше пороговой (94% масс.) приводит к обрыву составленных из частиц Sn_{0,97}Sb_{0,03}O₂ цепочек и вовлечению в процесс переноса заряда частиц SnO₂.

Об этом же свидетельствует концентрационная зависимость энергии активации электропроводности E_a (рис. 3), которая рассчитывалась в температурном интервале 20–120°C как $d(\ln R)/d([kT]^{-1})$. В данном интервале температурная зависимость электросопротив-

ления SnO_2 плёнок характеризуется экспоненциальным уменьшением сопротивления [8], что связывается с наличием потенциальных барьеров на межчастичных границах или ионизацией донорных уровней. Из приведённых на рис. 3 данных видно, что энергия активации электропроводности плёнок состава $x < 94\%$ масс. находится в интервале 0,03–0,065 эВ. Увеличение концентрации SnO_2 в составе плёночной композиции приводит к резкому росту E_a . Для плёнок на основе порошка чистого SnO_2 энергия активации достигает значения 0,5 эВ, которое сопоставимо по величине с высотами потенциальных барьеров на границе между частицами SnO_2 [9].

Помимо электросопротивления и энергии активации, концентрация SnO_2 в составе плёночной композиции определяет вид температурной зависимости сопротивления плёнок. Для плёнок на основе смесей порошков с концентрацией SnO_2 $x \geq 94\%$ масс. зависимость сопротивления от температуры в координатах $\ln R - 1/T$ представляет собой прямую линию во всем интервале измерений. Такое поведение характерно для поликристаллических плёнок на основе чистого диоксида олова, в том числе и для толстых плёнок [10]. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведена температурная зависимость электросопротивления плёнок на основе смеси порошков состава $x = 94\%$ масс. В отличие от линейной зависимости, изображённой на рис. 4, для плёнок на основе смесей порошков с концентрацией SnO_2 $x < 94\%$ масс. на температурной зависимости сопро-

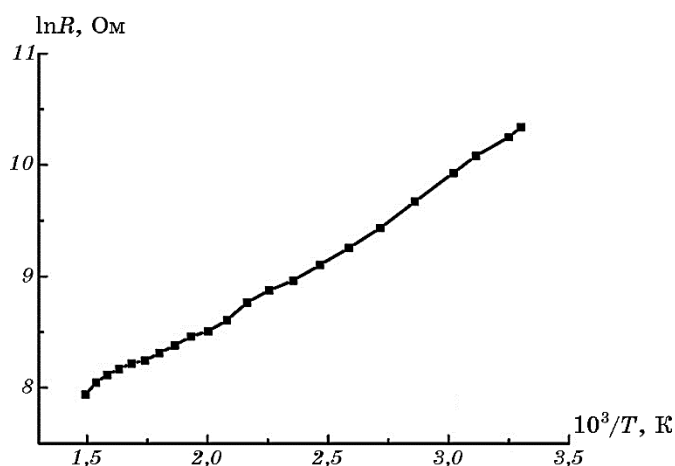


Рис. 4. Зависимость электросопротивления плёнок от температуры. Температура термообработки 700°C . Содержание SnO_2 в составе плёночной композиции $x = 94\%$ масс.

Fig. 4. Temperature dependence of electrical resistivity of films. Heat treatment temperature— 700°C . The content of SnO_2 in film composition $x = 94\%$ wt.

тивления можно выделить три участка, среди которых участок в интервале 150–250°C, на котором величина сопротивления плёнок не изменяется (рис. 5, кривая 1). Зависимости такого вида наблюдались нами для плёнок на основе порошка Sn_{0,97}Sb_{0,03}O₂ и смесей порошков состава $x < 94\%$ масс. независимо от режима их термообработки. Важно отметить, что такой вид зависимости наблюдается только при использовании контактов, изготовленных из Ni₃B-паст. Проведённые нами ранее исследования [11] показали, что на измерениях в аналогичных условиях температурных зависимостях плёнок такого же состава, нанесённых на Ag- или Ag/Pd-контакты, в температурном интервале 150–350°C наблюдается рост сопротивления (рис. 5, кривая 2).

Наблюдаемое различие в температурных зависимостях электросопротивления плёнок свидетельствует о важной роли материала контакта и может быть объяснено с учётом процессов адсорбции, диссоциации адсорбированных частиц и их десорбции с поверхности полупроводникового слоя. Как было сказано выше, диоксид олова является полупроводником *n*-типа, что подразумевает склонность к адсорбции молекул акцепторов. В атмосфере воздуха и при ненулевой влажности поверхность SnO₂ при комнатной температуре покрыта молекулами кислорода, воды и гидроксильными группами. Отметим, что поведение газочувствительных слоёв в атмо-

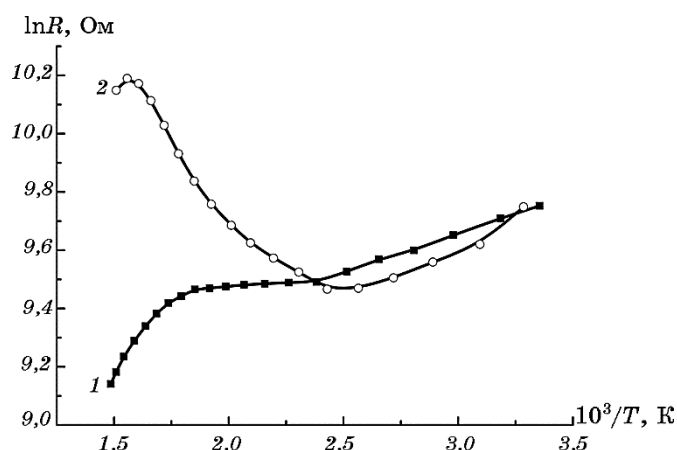
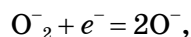


Рис. 5. Зависимость электросопротивления плёнок от температуры (1 — контакты изготовлены из Ni₃B-пасты, 2 — из Ag/Pd-пасты). Температура термообработки 700°C. Содержание SnO₂ в составе плёночной композиции $x = 90\%$ масс.

Fig. 5. Temperature dependence of electrical resistivity of films (with contact pads from Ni₃B-paste (1) or from Ag/Pd-paste (2)). Heat treatment temperature—700°C. The content of SnO₂ in film composition $x = 90\%$ wt.

сфере, в которой одновременно присутствуют кислород и пары воды, является крайне сложным; в литературе отсутствует очевидная простая интерпретация такого поведения. С ростом температуры процессы адсорбции–десорбции ускоряются и начинают определять поведение электросопротивления плёнок. В частности, рост сопротивления плёнок, нанесённых на Ag/Pd-контакты (рис. 5, кривая 2), связан с хемосорбированным на поверхности плёнок кислородом, который при $T > 150^\circ\text{C}$ переходит в атомарную форму [8]:



что сопровождается уменьшением числа электронов в зоне проводимости материала и ростом высоты потенциальных барьеров на границе между частицами.

Отсутствие участка роста сопротивления для плёнок, нанесённых на контакты, изготовленные из Ni₃B-паст, свидетельствует, что для них данный процесс не является определяющим, и приводит к выводу, что материал контакта влияет на заполняемость поверхности плёнок молекулами адсорбата. Такое влияние может быть объяснено различными механизмами адсорбции воды на серебряных и никелевых поверхностях. На поверхности благородных металлов вода адсорбируется преимущественно в молекулярной форме, в то время как на поверхности никеля имеет место диссоциативная адсорбция [12]. Диссоциация молекул воды на поверхности контакта сопровождается насыщением приконтактной области поверхности плёнок, нанесённых на изготовленные из Ni₃B-паст контакты, гидроксильными группами, конкурирующими с кислородом за адсорбционные центры. Доминирование гидроксильных групп, занятие ими свободных адсорбционных центров и снижение количества адсорбированного кислорода обуславливает тот факт, что рост сопротивления при $T > 150^\circ\text{C}$ не наблюдается. В пользу такого объяснения свидетельствует и наблюдающееся снижение величины электросопротивления плёнок при температурах выше 250°C (рис. 5), поскольку, как известно [8], именно при этой температуре начинается десорбция гидроксильных групп с поверхности диоксида олова.

Температурная зависимость электросопротивления плёнок связана с материалом контакта, и эта связь определяет механизм газовой чувствительности плёнок. Как известно, гидроксильные группы играют важную роль при взаимодействии поверхности диоксида олова с адсорбируемыми молекулами, например, с водородом [13], озоном [14], спиртами [15]. Исходя из этого, нанесение плёнок на основе SnO₂ на контакты, изготовленные из Ni₃B-паст, может представлять практический интерес при их использовании в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров.

4. ВЫВОДЫ

В работе исследованы свойства толстых плёнок на основе порошков SnO₂, нанесённых на контакты, изготовленные из паст на основе Ni₃V. Для электросопротивления исследованных плёнок характерна омичность во всем диапазоне температур измерений, как на воздухе, так и в вакууме. Материал контакта, изготовленного из Ni₃V-паст, не оказывает какого-либо существенного влияния на величину сопротивления плёнок при комнатной температуре в сравнении с контактами, изготовленными из Ag- и Ag/Pd-паст. В тоже время температурные зависимости сопротивления плёнок на основе Ni₃V в значительной степени отличаются от зависимостей, измеренных для плёнок, нанесённых на изготовленные из благородных металлов контакты.

Влияние материала контакта на температурные зависимости связывается с различными механизмами адсорбции воды на их поверхностях.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. P. R. Bueno and J. A. Varela, *Mater. Res.*, **9**, No. 3: 293 (2006).
2. S. M. A. Durrani, *Talanta*, **68**, Iss. 5: 1732 (2006).
3. S. Saukko and V. Lantto, *Thin Solid Films*, **436**, No. 1: 137 (2003).
4. S. J. Mears, *Use of Conductor Compositions in Electronic Circuits*, Patent No. US8097062 B2 (2012).
5. S. J. Mears, *Conductor Compositions and the Use Thereof*, Patent No. US7914709 B2 (2011).
6. Б. М. Рудь, Е. Я. Тельников, А. К. Марчук, А. Г. Гончар, А. А. Рогозинская, *Порошковая металлургия*, № 5/6: 142 (2013).
7. Д. Е. Дышель, *Порошковая металлургия*, № 5/6: 94 (2001).
8. M. Batzill and U. Diebold, *Progr. Surf. Sci.*, **79**, Iss. 2–4: 47 (2005).
9. M. C. Carotta, M. Benetti, E. Ferrari, A. Giberti, C. Malagu, M. Nogliati, B. Vendemiati, and G. Martinelli, *Sensors and Actuators B*, **126**, Iss. 2: 672 (2007).
10. R. Y. Borse and A. S. Garde, *Sensors and Transducers Journal*, **97**, Iss. 10: 64 (2008).
11. А. Г. Гончар, Н. И. Симан, Е. Я. Тельников, Л. И. Фиалка, А. К. Марчук, *Тезисы докладов Международной конференции «HighMatTech-2015» (5–8 октября 2015, Киев, Украина)*, с. 170.
12. A. J. Renouprez, P. Fouilloux, J. P. Candy, and J. Tomkinson, *Surf. Sci.*, **83**, Iss. 1: 285 (1979).
13. R. G. Pavelko, H. Daly, C. Hardacre, A. Vasiliev, and E. Llobet, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **12**: 2639 (2010).
14. G. Korotchenkov, I. Blinov, V. Brinzari, and J. R. Stetter, *Sensors and Actuators B*, **122**, Iss. 2: 519 (2007).
15. M. Li, L. J. Qiao, W. Y. Chu, and A. A. Volinsky, *Sensors and Actuators B*, **158**, Iss. 1: 340 (2011).

REFERENCES

1. P. R. Bueno and J. A. Varela, *Mater. Res.*, **9**, No. 3: 293 (2006).
2. S. M. A. Durrani, *Talanta*, **68**, Iss. 5: 1732 (2006).
3. S. Saukko and V. Lantto, *Thin Solid Films*, **436**, No. 1: 137 (2003).
4. S. J. Mears, *Use of Conductor Compositions in Electronic Circuits*, Patent No. US8097062 B2 (2012).
5. S. J. Mears, *Conductor Compositions and the Use Thereof*, Patent No. US7914709 B2 (2011).
6. B. M. Rud', E. Ya. Tel'nikov, A. K. Marchuk, A. G. Gonchar, and A. A. Rogozinskaya, *Poroshkovaya Metallurgiya*, Nos. 5/6: 142 (2013) (in Russian).
7. D. E. Dyshel', *Poroshkovaya Metallurgiya*, Nos. 5/6: 94 (2001) (in Russian).
8. M. Bätzill and U. Diebold, *Progr. Surf. Sci.*, **79**, Iss. 2–4: 47 (2005).
9. M. C. Carotta, M. Benetti, E. Ferrari, A. Giberti, C. Malagu, M. Nogliati, B. Vendemiati, and G. Martinelli, *Sensors and Actuators B*, **126**, Iss. 2: 672 (2007).
10. R. Y. Borse and A. S. Garde, *Sensors and Transducers Journal*, **97**, Iss. 10: 64 (2008).
11. A. G. Gonchar, N. I. Siman, E. Ya. Tel'nikov, L. I. Fiyalka, and A. K. Marchuk, *Abstr. Int. Conf. 'HighMatTech-2015' (October 5–8, 2015, Kiev, Ukraine)*, p. 170 (in Russian).
12. A. J. Renouprez, P. Fouilloux, J. P. Candy, and J. Tomkinson, *Surf. Sci.*, **83**, Iss. 1: 285 (1979).
13. R. G. Pavelko, H. Daly, C. Hardacre, A. Vasiliev, and E. Llobet, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **12**: 2639 (2010).
14. G. Korotchenkov, I. Blinov, V. Brinzari, and J. R. Stetter, *Sensors and Actuators B*, **122**, Iss. 2: 519 (2007).
15. M. Li, L. J. Qiao, W. Y. Chu, and A. A. Volinsky, *Sensors and Actuators B*, **158**, Iss. 1: 340 (2011).