

На правах рукописи



СИНЁВ ИЛЬЯ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ
ДИОКСИДА ОЛОВА**

05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Саратов – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» на кафедре материаловедения, технологии и управления качеством

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Кисин Владимир Владимирович

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (г. Саратов)

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки РФ, доктор физ.-мат. наук, профессор

Рембеза Станислав Иванович

Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж)

доктор физ.-мат. наук, профессор

Зайцев Борис Давыдович

СФ ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН (г. Саратов)

Ведущая организация

ОАО "НПП "Дельта" (г. Москва)

Защита состоится 23 октября 2014 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 в Саратовском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <http://www.sgu.ru/dissertation-council/d-212-243-01/dissertaciya-i-v-sinyova>

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аникин В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В качестве объекта исследования были выбраны газочувствительные тонкопленочные резисторы на основе диоксида олова, которые широко исследуются в настоящее время, одновременно находя практическое применение как в лабораторных, так и в выпускаемых промышленностью сенсорах газа и мультисенсорных микросистемах для анализа сложных парогазовых смесей. Рассматривается температурная зависимость проводимости, отражающая с одной стороны физику процессов в газочувствительном резисторе и являющаяся, с другой стороны, одной из важных характеристик сенсора как прибора. С помощью этой характеристики выбираются параметры режима работы сенсора. Измерение проводимости при циклическом изменении температуры позволяет получить информацию о парциальном давлении постороннего газа в воздухе и о сорте этого газа. То есть, знание температурной зависимости проводимости необходимо для корректного использования сенсора, а также для распознавания и анализа сложных газовых смесей. К началу настоящей работы в научной литературе отмечалось, что на зависимости сопротивления тонких газочувствительных пленок оксида олова наблюдается участок увеличения сопротивления с температурой, что не характерно для полупроводников. Такой участок не наблюдался для монокристаллов или сильно легированных пленок. В литературе предлагаются качественные объяснения указанной особенности температурной зависимости сопротивления, однако они противоречивы. Одни авторы связывают эту особенность с влиянием влажности, другие – с изменением заполнения поверхности пленок адсорбированными частицами. Таким образом, исследования температурной зависимости проводимости резистивных сенсоров газа до сих пор не завершены, а теория остается предметом дискуссии в научной литературе. Поэтому исследование процессов, определяющих вид температурной зависимости проводимости резистивных сенсоров газа, улучшение понимания механизма влияния температуры на проводимость, математическое описание температурной зависимости проводимости резистивных сенсоров газа актуальны и с фундаментальной, и с прикладной точек зрения.

Целью диссертационной работы является выяснение механизма процессов, определяющих температурную зависимость проводимости тонких пленок диоксида олова, построение математической модели, описывающей температурную зависимость проводимости тонких пленок диоксида олова, и улучшение параметров полупроводниковых газовых сенсоров и мультисенсорных систем на их основе.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи исследования:**

- 1) формирование тонких пленок диоксида олова с морфологией, перспективной для их применения в сенсорах газа;
- 2) экспериментальное изучение особенностей температурной зависимости проводимости газочувствительных пленок диоксида олова;
- 3) выявление процессов на поверхности и в объеме газочувствительных полупроводниковых пленок, определяющих их проводимость;
- 4) разработка математической модели, описывающей влияние температуры на проводимость пленок диоксида олова в кислородсодержащей атмосфере и в присутствии паров воды;
- 5) поиск методов снижения дрейфа сопротивления сенсоров и улучшение распознавательной способности мультисенсорных систем на их основе.

Научная новизна работы заключается в разработке оригинальной математической модели проводимости резистивного сенсора на основе тонкой пленки металлоксидного широкозонного полупроводника, количественно описывающей температурную зависимость проводимости и зависимость проводимости от влажности окружающего воздуха. Особенностью и новизной предлагаемой модели является то, что она количественно разрабатывает гипотезу, согласно которой донорное действие паров воды обусловлено пассивацией гидроксильными группами центров адсорбции кислорода на поверхности пленки полупроводника. Образование локального максимума на температурной зависимости проводимости объяснено сменой форм адсорбции кислорода на поверхности полупроводника.

Практическая значимость работы. Предложена методика расчета температурной зависимости проводимости резистивных сенсоров газа на основе слоев диоксида олова. Полученные математические соотношения, связывающие друг с другом параметры активного слоя сенсора, параметры режима его работы, параметры окружающей атмосферы, показали пути улучшения качества анализа газоздушных смесей, в частности, повышения надежности классификации сложных смесей. Эти возможности экспериментально продемонстрированы на действующих образцах сенсора газа и мультисенсорных систем на их основе.

Положения, выносимые на защиту.

1. На температурной зависимости сопротивления газочувствительных плёнок диоксида олова с открытыми наноразмерными порами, ориентированными перпендикулярно подложке, сформированными путем высокочастотного реактивного магнетронного распыления металлоксидной мишени при технологических параметрах, соответствующих максимуму зависимости плотности образования зародышей от давления в реакторе, наблюдаются наличие участка с положительным температурным коэффициентом сопротивления и

насыщение зависимости сопротивления пленки от влажности при высоком уровне влажности.

2. Вид температурной зависимости сопротивления резистивного сенсора на основе тонкой пленки диоксида олова зависит от скорости изменения температуры. Участки увеличения сопротивления с ростом температуры становятся более выраженными при уменьшении скорости изменения температуры. Эти экспериментальные результаты объясняются процессами адсорбции, диссоциации адсорбированных частиц и их десорбции с поверхности полупроводника. Донорное действие паров воды интерпретируется как результат пассивации центров адсорбции кислорода гидроксильными группами.
3. Рассчитанная в рамках модели плоских зон зависимость концентрации свободных носителей заряда от температуры удовлетворительно объясняет особенности температурной зависимости сопротивления газочувствительных пленок диоксида олова, в том числе участок увеличения сопротивления пленки с ростом температуры. При этом для расчета температурной зависимости сопротивления пленки при фиксированном уровне влажности достаточно ограничиться предположением о наличии на поверхности одного типа центров адсорбции, тогда как для описания семейства зависимостей, полученных при разном уровне влажности, необходимо учитывать наличие трех типов центров адсорбции.
4. Предварительная температурная обработка тонких пленок диоксида олова путем выдержки при температуре 450°C в атмосфере сухого воздуха и последующим быстрым охлаждением до рабочей температуры стабилизирует температурную зависимость проводимости, уменьшает дрейф сопротивления сенсора в чистом воздухе и увеличивает распознавательную способность мультисенсорной системы на их основе, что объясняется стабилизацией заполнения центров адсорбции за счет замораживания высокотемпературного состояния поверхности на время измерения.

Достоверность полученных результатов исследования определяется применением современных, апробированных и взаимодополняющих методов и методик исследования, использованием передового технологического и измерительного оборудования, статистической обработкой экспериментальных результатов, соответствием полученных результатов современным научным представлениям, широкой апробацией результатов работы, практической реализацией результатов, имеющих научную новизну, в действующих образцах приборов.

Личный вклад автора. Представленные в диссертационном исследовании результаты получены автором лично либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в обсуждении идей, формулировке научных проблем и выборе направлений

исследования, обсуждении результатов, направлений практического применения полученных результатов, написании статей и докладов на международные и всероссийские конференции. Работу по анализу литературы, основные экспериментальные исследования, обработку экспериментальных данных, анализ результатов с помощью построенной математической модели автор выполнил лично. При использовании результатов других авторов и результатов, полученных в соавторстве, даются соответствующие ссылки.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. VII Международная научно-практическая конференция "Фундаментальные и прикладные исследования в системе образования", 26 февраля 2009 г., г. Тамбов;
2. Международная конференция «Основные тенденции развития химии в начале XXI-го века», 21-24 апреля 2009 г., г. Санкт-Петербург;
3. Вторая научно-техническая конференция «Методы создания, исследования микро-, наносистем и экономические аспекты микро-, наноэлектроники», 26-29 мая 2009г., г. Пенза;
4. XXII международная конференция «Математические методы в технике и технологиях», 25-28 мая 2009 г., г. Псков;
5. IV конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 7-9 сентября 2009 г., г. Саратов;
6. XXI симпозиум «Современная химическая физика», 25.09 – 06.10 2009 г., г. Туапсе;
7. "Второй международный конкурс научных работ молодых ученых в области нанотехнологий", 6-8 октября 2009 г., г. Москва;
8. Международная научная конференция «Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур», 21-23 октября 2009 г., г. Харьков;
9. Международная конференция «Композит – 2010: Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология.», 30 июня – 2 июля 2010 г., г. Саратов;
10. Международное совещание заведующих кафедрами материаловедения и технологии конструкционных материалов, 21-23 сентября 2010 г., г. Саратов;
11. Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Инновации и актуальные проблемы техники и технологии», 26-29 октября 2010 г., г. Саратов;
12. VI всероссийская конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 13-15 сентября 2011 г., г. Саратов;

13. Пятая Международная научная конференция «Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур», 12-14 октября 2011 г., г. Харьков;
14. VII всероссийская конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 24-26 сентября 2012 г., г. Саратов; VIII всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 3-5 сентября 2013 г., г. Саратов.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении исследований по гранту РФФИ № 10-08-00631-а «Принципы создания аппаратно-программных комплексов многопараметрического распознавания многокомпонентных газовых смесей на основе мультисенсорных микросистем»

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 29 печатных работ, в том числе 10 статей в журналах, включенных в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения и списка литературы. Основная часть работы изложена на 209 страницах машинописного текста, включая 29 страниц библиографии, содержащей 277 наименований источников. Работа содержит 74 рисунка и 6 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрен предмет исследования, обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, охарактеризованы новизна полученных результатов, их научное и практическое значение, апробация работы, публикации по теме работы, личный вклад автора в выполнение работы, а также приведены сведения о структуре и объеме диссертации.

В первой главе анализируются накопленные за последние пятьдесят лет исследований литературные данные о свойствах газочувствительных полупроводниковых материалов. В частности, отмечено следующее.

Экспериментально установлено, что температурная зависимость проводимости полупроводниковых сенсоров газа может иметь особенности. В широком диапазоне рабочих температур, для целого ряда газочувствительных материалов, не только металлооксидных, но и, например, CdS, наблюдается положительный температурный коэффициент сопротивления, хотя в других проявлениях материал демонстрирует полупроводниковые свойства. Это явление не наблюдается в объемных

материалах и в тонких пленках, если они сильно легированы. Однако в этом случае не проявляется и газочувствительность материала.

Ряд авторов связывает данную особенность температурной зависимости проводимости с присутствием паров воды в окружающей атмосфере. Проявление положительного температурного коэффициента сопротивления на температурной зависимости проводимости, измеренной в атмосфере осушенного воздуха, объясняется неконтролируемыми остатками влаги в атмосфере. Другая точка зрения на природу этой особенности состоит в том, что она вызывается сменой форм адсорбции частиц, в первую очередь кислорода и воды, на поверхности полупроводника.

Большой прогресс в последние десятилетия наблюдается в экспериментальном и теоретическом исследовании устройства поверхности граней кристаллических зерен со структурой рутила и конкретных конфигураций адсорбирующихся на них частиц, в частности, кислорода и воды. Расчеты из первых принципов находят свое подтверждение как в спектроскопических исследованиях, так и в прямых экспериментах по наблюдению поверхности методами зондовой микроскопии. Это создает надежную базу для построения не только феноменологических, но и микроскопических моделей газочувствительности и температурной зависимости проводимости.

Особое внимание в литературе уделено математическому моделированию температурной зависимости газочувствительности. Для некоторых моделей газочувствительности пленок, например, модели двойного барьера Шоттки, удалось рассчитать температурную зависимость проводимости пленок. Однако изучение и моделирование температурной зависимости проводимости газочувствительных тонкопленочных резисторов остаются актуальными и продолжают вызывать интерес исследователей во всем мире.

Во второй главе излагаются результаты исследований, полученные при отработке технологии формирования образцов для исследований. При формировании газочувствительных структур использовались технологии резистивного и электронно-лучевого испарения, ионной очистки, реактивного магнетронного распыления с высокочастотным смещением мишени и подложки, ионного травления в высокочастотном разряде.

Описывается разработанный метод получения газочувствительных поликристаллических плёнок диоксида олова с наноразмерным межкристаллитным пространством и зёрнами ориентированными перпендикулярно подложке (рисунок 1 а, б), перспективных для применения в сенсорах газа. Показано, что такие слои можно формировать методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления стехиометрической мишени, управляя на первой стадии плотностью и размером зародышей в условиях высокой скорости осаждения материала

на подложку и разращивая полученные зародыши на второй стадии в режиме, обеспечивающем рост зерен с совершенной кристаллической структурой. Определены технологические параметры, при которых наблюдается максимум плотности зародышей (рисунок 2 а). В этом случае размер зерен составлял порядка 30 нм, а характерный размер межзеренного пространства – 10 нм (рисунок 2 б, в).

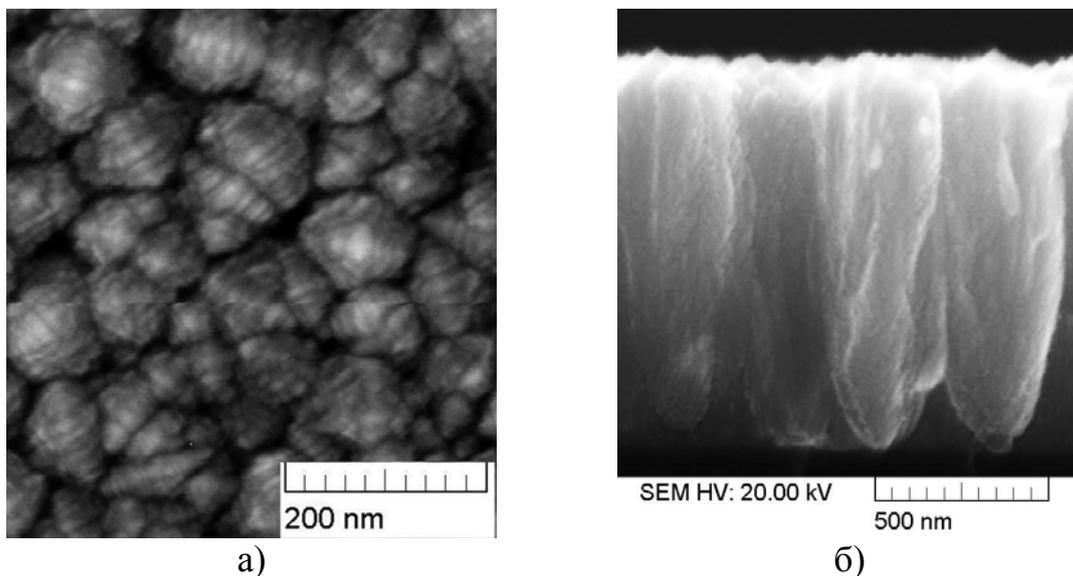


Рисунок 1 СЭМ изображение: а) – поверхности, б) – скола газочувствительной пленки диоксида олова

Кроме того, в главе описаны структура и оснащение установки для изучения электрофизических свойств газочувствительных тонких пленок и структур. Установка автоматизирована и работает под управлением программы, разработанной в LabView 8.5. Приводятся результаты тестирования образцовых объектов, анализ которых позволил определить рабочий диапазон оборудования, оценить воспроизводимость и погрешность проводимых с его помощью измерений. Показано, что полученные образцы имеют газочувствительность, позволяющую применять их в приборах для определения парциального давления газа в кислородосодержащей атмосфере (Рисунок 3).

В третьей главе приводятся результаты исследования температурной зависимости проводимости газочувствительных пленок диоксида олова. Показано, что на температурной зависимости проводимости наблюдается участок с положительным температурным коэффициентом сопротивления в диапазоне температур 300-400°C (рисунок 4 а). Увеличение содержания паров воды в окружающей среде приводит к более ярко выраженному проявлению данной особенности и приводит к увеличению проводимости образца, но при относительной влажности окружающей среды выше 50% зависимость проводимости образца от уровня влажности воздуха насыщается.

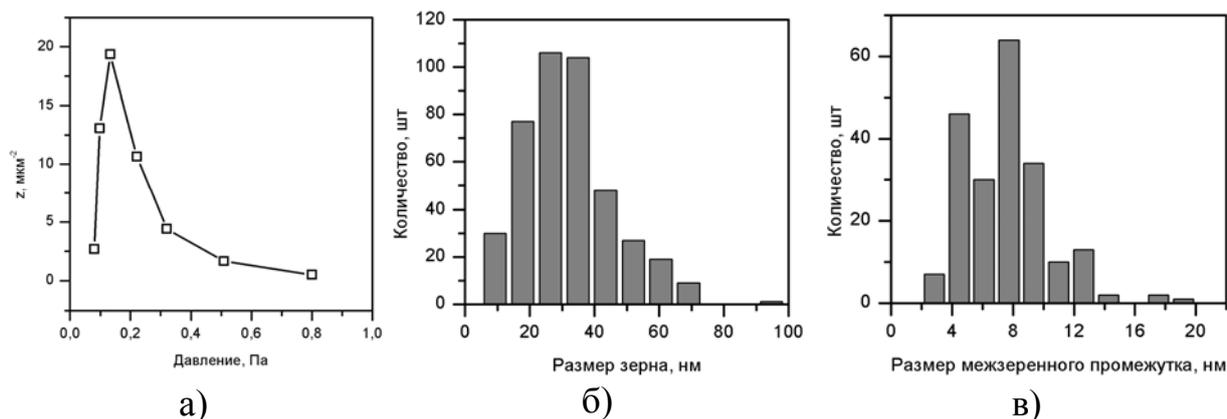


Рисунок 2 а) – зависимость плотности зародышей от давления в камере, б) - гистограмма распределения размера зерен в пленках диоксида олова, в) - гистограмма распределения характерного размера межзеренного пространства

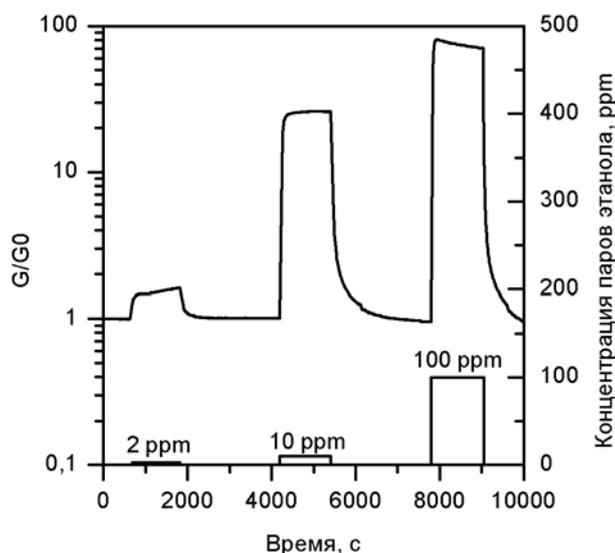


Рисунок 3 Кратность изменения проводимости пленки диоксида олова при воздействии на нее паров этанола концентрацией 2, 10, 100 ppm

Площадь под максимумом на температурной зависимости проводимости зависит от режима измерения (рисунок 4 б), и перестает изменяться при снижении скорости изменения температуры образца.

Проводимость пленок диоксида олова существенно зависит от условий хранения, режима предыдущей работы и т.д. Поэтому результаты измерения проводимости, сделанные через продолжительные промежутки времени могут отличаться друг от друга. Предварительная температурная обработка образца с последующим быстрым охлаждением или выполнением нескольких циклов нагрев – охлаждение приводит к стабилизации вида температурной зависимости проводимости.

Экспериментально определена зависимость проводимости образца при различных температурах от влажности окружающего воздуха.

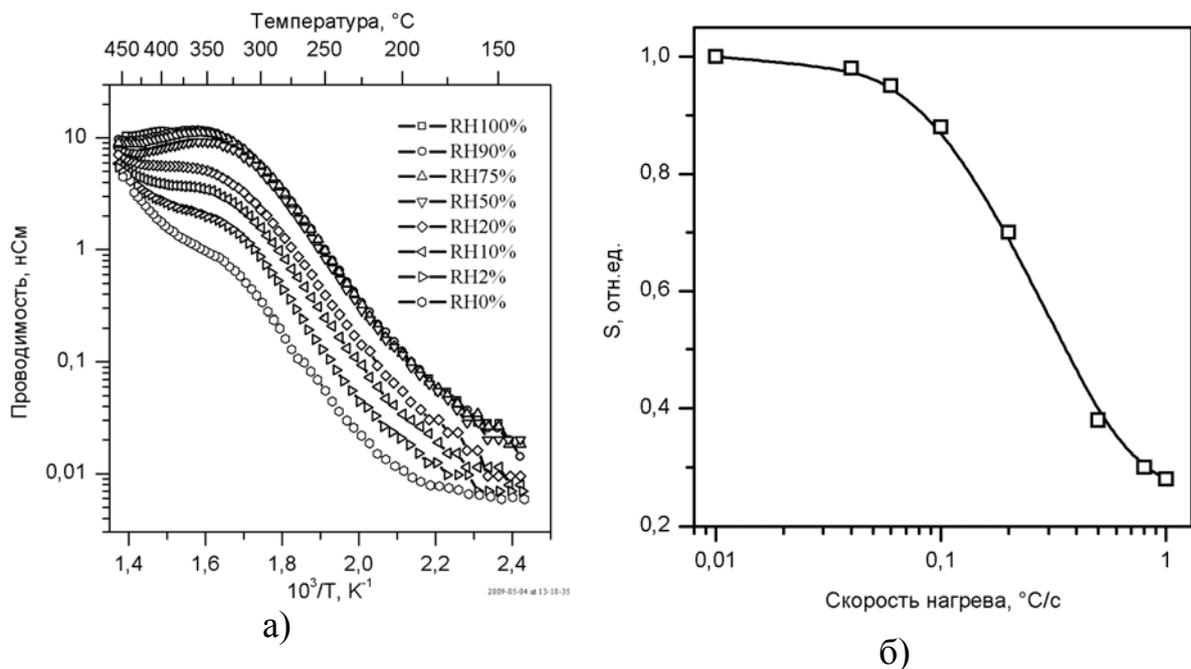


Рисунок 4 а) – температурная зависимость проводимости пленки диоксида олова при различной относительной влажности окружающей среды, б) – зависимость площади S под максимумом на кривой температурной зависимости проводимости от скорости изменения температуры

В четвертой главе выделены и математически описаны основные процессы, которые определяют температурную зависимость проводимости пленок диоксида олова в атмосфере, содержащей кислород и пары воды. Записана система уравнений, описывающая стационарную концентрацию свободных носителей заряда в объеме зерна пленки.

Уравнения отражают степень окисленности поверхности образца, условия окружающей среды в предположении о существовании на поверхности одного, двух и трех типов центров адсорбции. Полученная система уравнений проанализирована с помощью численных методов, а в частных случаях - аналитически. Показано, что особенности температурной зависимости проводимости могут быть описаны моделью, построенной с учетом одного типа центра адсорбции, но при этом не удастся удовлетворительно аппроксимировать результаты экспериментов при высокой влажности окружающей атмосферы. Введение второго типа центра адсорбции в модель также не позволяет адекватно описывать влияние влажности. Только модель, построенная в предположении 3 типов центров адсорбции, позволила удовлетворительно аппроксимировать экспериментальные результаты (рисунок 5).

Определены диапазоны температур, в которых на результаты расчетов наиболее сильно влияют те или иные параметры модели. На этой основе предложен алгоритм выбора параметров аппроксимации.

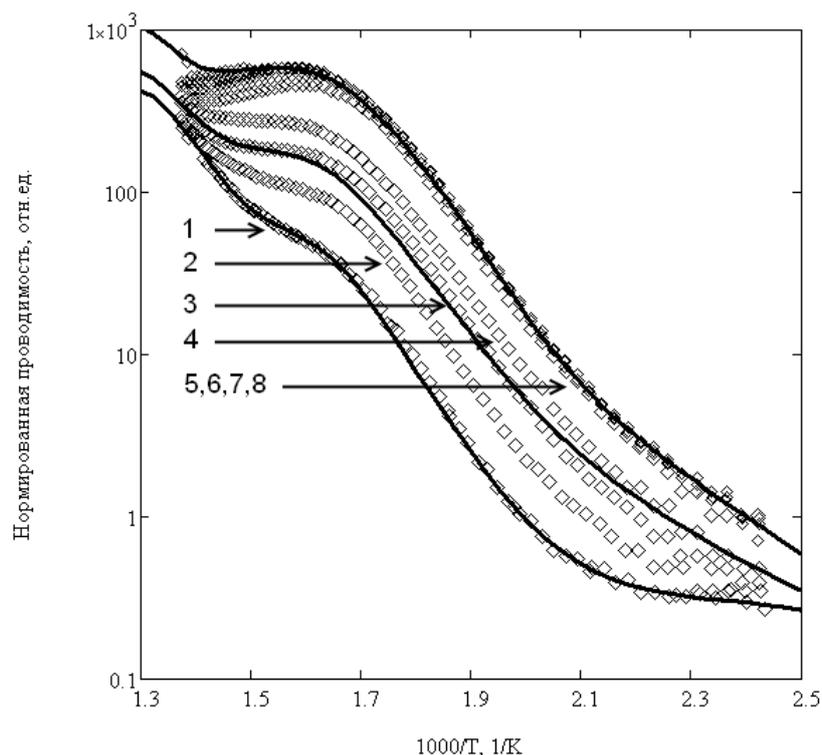


Рисунок 5 Зависимость проводимости газочувствительной пленки диоксида олова от температуры при различном уровне влажности окружающей среды. Маркеры – экспериментальные точки, соответствующие 1) – 0%, 2) – 2%, 3) – 10%, 4) – 20%, 5) – 50%, 6) – 75%, 7) – 90%, 8) – 100% относительной влажности воздуха при 30°C. Линии – результаты расчета согласно предложенной модели.

В пятой главе на основе анализа результатов расчетов, выполненных с помощью разработанной модели, и экспериментальных данных по динамике отклика и восстановления сенсора сформулирована гипотеза о возможности улучшения параметров сенсора и мультисенсорной системы за счет более воспроизводимого заполнения поверхности адсорбированными частицами. Улучшение параметров сенсора основано на том, что при повышении температуры процессы установления равновесного заполнения поверхности (адсорбционно-десорбционные и диффузионные процессы, а также процессы электронного обмена между поверхностью и объемом) ускоряются. Предложен метод повышения стабильности сопротивления сенсора (базовой линии) и воспроизводимости отклика на появление в окружающем воздухе примеси анализируемого газа, основанный на замораживании высокотемпературного заполнения поверхности адсорбированными частицами на время проведения измерений.

В главе приводятся результаты экспериментального исследования по стабилизации базовой линии. Результаты обработки отклика мультисенсорной микросистемы с помощью линейного дискриминантного

анализа показали увеличение расстояния Евклида - Махаланобиса между классами при распознавании паров аммиака в воздухе с использованием предложенного метода предварительной температурной обработки (рисунок 6).

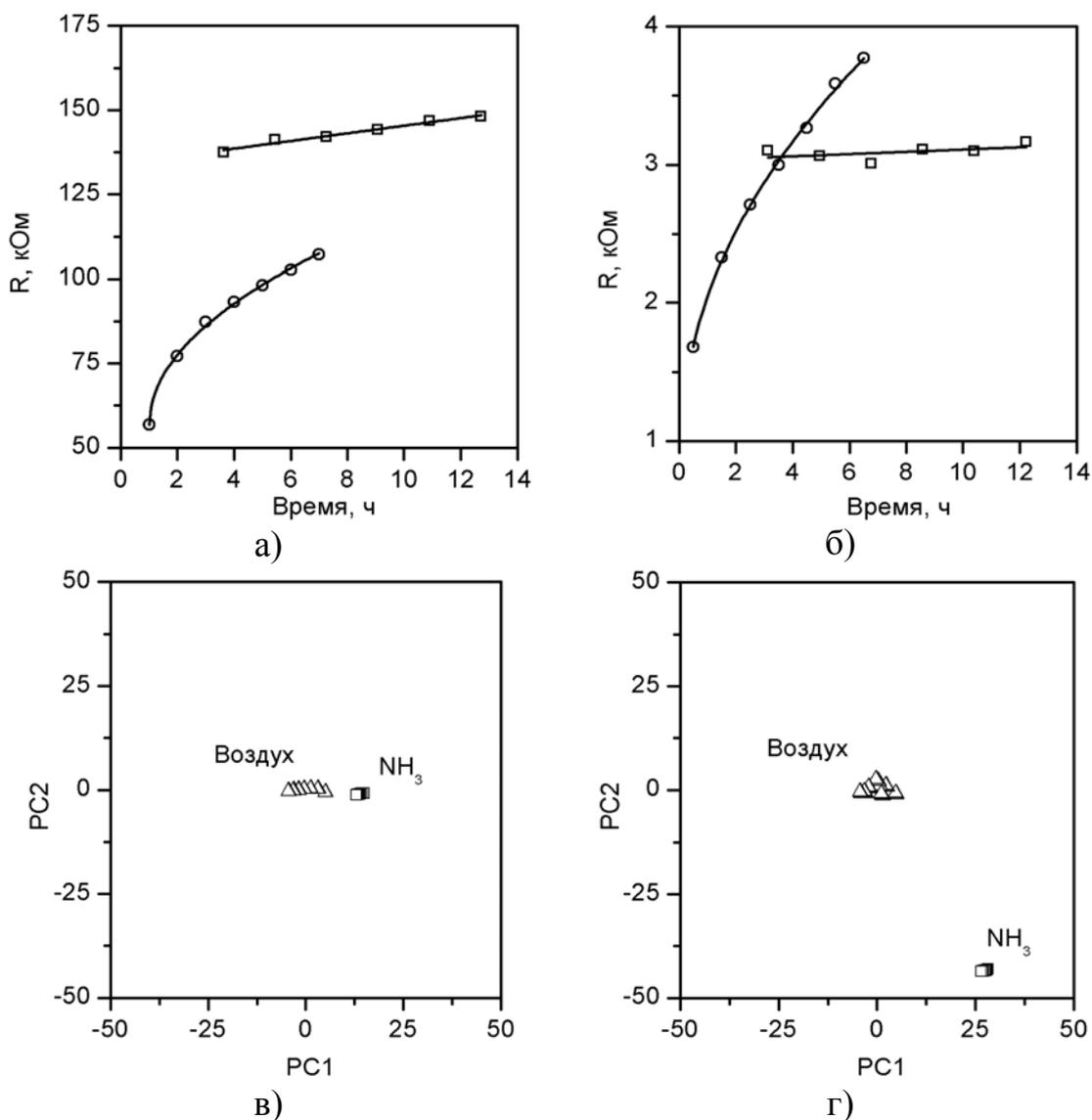


Рисунок 6 Зависимость сигнала сенсора в атмосфере воздуха (а) и пробы (б): ○ – без предварительного циклического изменения температуры; □ – после предварительного циклического изменения температуры. Сигналы сенсора в атмосфере чистого воздуха и пробы, построенные в пространстве главных компонент, измеренные в) без предварительной термической обработки; г) после предварительной термической обработки

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Разработан вариант метода осаждения тонких плёнок оксидов металлов с помощью высокочастотного реактивного магнетронного распыления стехиометрической мишени, особенностью которого являлось проведения процесса в два этапа. Этап формирования зародышей проводился при высокой скорости распыления мишени, а этап разрачивания зерен при понижении скорости распыления, но в условиях затенения одних растущих зерен пленки другими. Этим методом получены газочувствительные плёнки диоксида олова с открытыми наноразмерными порами, ориентированными перпендикулярно подложке, и обладающие совокупностью параметров, перспективной для применения в сенсорах газа.

2) Показано, что на температурной зависимости проводимости газочувствительных пленок, сформированных по разработанной технологии, наблюдается участок с положительным температурным коэффициентом сопротивления. Увеличение концентрации паров воды в окружающей атмосфере приводит к более выраженному проявлению этой особенности.

3) Вид температурной зависимости проводимости зависит от скорости изменения температуры. Причем участок с положительным температурным коэффициентом сопротивления становится более выраженным при уменьшении скорости изменения температуры. Температурная зависимость проводимости может быть стабилизирована путем предварительной температурной обработки образца с последующим быстрым охлаждением или выполнением нескольких циклов нагрева – охлаждения. Указанная совокупность экспериментальных результатов объясняется процессами на поверхности полупроводника: адсорбцией, диссоциацией адсорбированных частиц и их десорбцией, электронным обменом между поверхностными состояниями, индуцированными адсорбированными частицами, и объемом зерна. Донорное действие воды интерпретируется как результат пассивации центров адсорбции кислорода гидроксильными группами.

4) Функция, аппроксимирующая температурную зависимость проводимости газочувствительных пленок диоксида олова, рассчитана в рамках модели плоских зон. При этом для аппроксимации температурной зависимости проводимости при фиксированном уровне влажности достаточно ограничиться предположением о наличии на поверхности одного типа центров адсорбции, тогда как для описания семейства кривых, полученных при разном уровне влажности, необходимо учитывать три типа центров адсорбции.

5) Применение предварительного термоциклирования при распознавании примеси аммиака в воздухе позволяет существенно повысить расстояние Евклида-Махаланобиса в процессе распознавания

примеси аммиака в воздухе, что приводит к повышению распознавательной способности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Синёв И.В., Потапов С.В., Никитина С.Д. и др. Механизмы электрохимической сорбции оксида углерода (II) на поверхности тонких пленок диоксида олова //Башкирский химический журнал. – 2009. – Т. 16. – №.4. – С. 125-128.
2. Синёв И.В., Симаков В.В., Никитина Л.В., Колоколов М.В. Газочувствительные свойства наноструктурированных тонкопленочных слоев диоксида олова //Нанотехника. – 2010. – № 1 (21). – С.24-28.
3. Синёв И.В., Потапов С.В., Никитина С.Д., Симаков В.В. Ионный транспорт заряда в газочувствительных наноструктурированных слоях диоксида олова //Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53. – №. 9. – С. 47-50.
4. Синёв И.В., Симаков В.В., Никитина С.Д., Сякина С.Д. Распознавание газовых смесей на основе анализа температурных зависимостей чувствительности наноструктурированных тонкопленочных слоев диоксида олова к газам-восстановителям //Нанотехника. – 2010. – № 4(24). – С. 22-26.
5. Синёв И.В., Симаков В.В., Никитина Л.В. Аппаратно-программный комплекс многопараметрического распознавания многокомпонентных газовых смесей на основе мультисенсорных микросистем // Башкирский химический журнал. – 2010. – Т. 17. - №5. – С. 125-127.
6. Синёв И.В., Никитина Л.В., Симаков В.В. и др. Стабильность электрических свойств широкозонных газочувствительных наноструктурированных материалов //Нано- и микросистемная техника. – 2011. – №7. – С. 10-14.
7. Синёв И.В., Симаков В.В., Смирнов А.В., Сякина С.Д., Гребенников А.И., Кисин В.В. Формирование пленок диоксида олова с вертикально ориентированными нанопорами //Нанотехника. – 2011. – № 3. – С. 45-46.
8. Синёв И.В., Симаков В.В., Ворошилов А.С., и др. Распознавание запахов дыма на основе анализа динамики отклика мультисенсорной микросистемы //Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 9. – С. 49-54.
9. Синёв И.В., Смирнов А.В., Гребенников А.И. и др. Влияние предварительного нагрева на распознавательную способность мультисенсорной микросистемы //Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 1. – С. 52-56.
10. Синёв И.В., Смирнов А.В., Гребенников А.И., Грибов А.Н., Симаков В.В., Кисин В.В. Отклик газочувствительной микросистемы на запах

перегретой изоляции электрического кабеля //Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 2. – С. 53-56.

публикации в других изданиях:

11. Синёв И.В., Потапов С.В., Никитина С.Д., Ворошилов А.С., Симаков В.В. Влияние адсорбции в мезопорах на низкочастотный импеданс тонкоплёночных слоёв оксида олова (IV) //Материалы международной конференции «Основные тенденции развития химии в начале XXI-го века», 21-24 апреля 2009 г., Санкт-Петербург. – 2009, - С. 104-106.

12. Синёв И.В., Симаков В.В., Якушева О.В., Гребенников А.И., Кисин В.В. Температурная зависимость проводимости нанокристаллических слоёв диоксида олова в сухом и влажном воздухе //Труды II научно-технической конференции «Методы создания, исследования микро-, наносистем и экономические аспекты микро-, наноэлектроники», 26-29 мая 2009г., Пенза. – 2009, – С. 22-25.

13. Синёв И.В., Симаков В.В., Ворошилов А.С., Потапов С.В., Кисин В.В. Релаксация проводимости тонких плёнок диоксида олова при изменении состава окружающей среды //Труды II научно-технической конференции «Методы создания, исследования микро-, наносистем и экономические аспекты микро-, наноэлектроники», 26-29 мая 2009г., Пенза. – 2009, – С. 59-61.

14. Синёв И.В., Никитина С.Д., Потапов С.В., Симаков В.В. Моделирование кинетики адсорбционных процессов в мезопористых полупроводниковых материалах //Сборник трудов XXII международной конференции «Математические методы в технике и технологиях», 25-28 мая 2009 г., г. Псков, - Псков: Изд-во Псковского государственного политехнического института. – 2009. – Т. 8. – С. 116-118.

15. Синёв И.В., Потапов С.В., Никитина С.Д., Симаков В.В. Ионный транспорт заряда в газочувствительных структурах на основе тонких плёнок оксидов металлов //Сборник трудов XXII международной конференции «Математические методы в технике и технологиях», 25-28 мая 2009 г., г. Псков, - Псков: Изд-во Псковского государственного политехнического института. – 2009. – Т. 8. – С. 108-112.

16. Синёв И.В., Потапов С.В., Никитина С.Д., Симаков В.В. Моделирование кинетики изменения проводимости тонкоплёночных газочувствительных структур //Сборник трудов XXII международной конференции «Математические методы в технике и технологиях», 25-28 мая 2009 г., г. Псков, - Псков: Изд-во Псковского государственного политехнического института. – 2009. – Т. 8. – С. 105-108.

17. Синёв И.В., Потапов С.В., Никитина С.Д., Симаков В.В. Влияние состава окружающей среды на низкочастотный импеданс тонких плёнок диоксида олова //Тезисы докладов IV конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 7-9 сентября

2009 г., г. Саратов, - Саратов: Изд-во Саратовского университета. – 2009. – С. 106-108.

18. Синёв И.В., Бирюкова Н.С, Потапов С.В., Никитина С.Д. Влияние влажности на проводимость мезопористых плёнок диоксида олова //Тезисы докладов IV конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 7-9 сентября 2009 г., г. Саратов, - Саратов: Изд-во Саратовского университета. - 2009. – С. 109-111.

19. Синёв И.В., Потапов С.В., Никитина С.Д., Симаков В.В., Бирюкова Н.С. Синтез мезопористых тонких полупроводниковых пленок с контролируемой ориентацией пор // Сборник тезисов докладов участников "Второго международного конкурса научных работ молодых ученых в области нанотехнологий", 6-8 октября 2009 г., г.Москва, - Москва: Изд-во ГК "РОСНАНО". – 2009. – С. 564-566.

20. Синёв И.В., Потапов С.В., Никитина С.Д., Ворошилов А.С., Симаков В.В. Влияние процессов электрохимической сорбции на механизмы ионно-электронного транспорта заряда в широкозонных полупроводниках //Сборник научных трудов VII-й Международной научно-практической конференции (заочной) "Фундаментальные и прикладные исследования в системе образования", 26 февраля 2009 г., г. Тамбов, - Тамбов: Издательский дом ТГУ им. Г.Р. Державина. – 2009. – С. 209-211.

21. Синёв И.В., Никитина С.Д., Потапов С.В., Гребенников А.И., Симаков В.В., Кисин В.В. Процессы заполнения и очистки микро- и мезопор в наноструктурированных полупроводниковых материалах //Сборник научных трудов международной научной конференции «Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур», 21-23 октября 2009г., г. Харьков, - Харьков: НФТЦ МОН и НАН Украины. – 2009. - Т. 2. – С. 388-391.

22. Синёв И.В., Никитина С.Д., Потапов С.В., Колоколов М.В., Симаков В.В. Особенности адсорбционных процессов в мезопористых полупроводниковых материалах //Доклады международной конференции «Композит – 2010: Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология.», 30 июня – 2 июля 2010 г., г. Саратов, - Саратов: издательство СГТУ. – 2010. – С. 312-313.

23. Синёв И.В., Вениг С.Б., Кисин В.В., Симаков В.В. Анализ размерных эффектов в нанокристаллических тонких пленках как многоуровневая проблемно-ориентированная задача для обучения в области технологии новых материалов и покрытий //Сборник материалов международного совещания заведующих кафедрами материаловедения и технологии конструкционных материалов, 21-23 сентября 2010 г., г. Саратов, - Саратов: издательство СГТУ. – 2010. – С. 85-90.

24. Синёв И.В., Галушка В.В., Кисин В.В. Формирование тонких пленок с открытыми порами, имеющих перспективы широкого применения

//Материалы всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновации и актуальные проблемы техники и технологии», 26-29 октября 2010г., Саратов. – 2010. - С. 5-6.

25. Синёв И.В., Смирнов А.В., Симаков В.В. Зародышеобразование и рост газочувствительных наноструктурированных плёнок диоксида олова //Тезисы докладов VI всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика», 13-15 сентября 2011 г., г. Саратов, - Саратов: Изд-во Саратовского университета. - 2011. – С. 56-57.

26. Синёв И.В., Смирнов А.В., Сякина С.Д., Гребенников А.И., Симаков В.В., Кисин В.В. Формирование покрытия с открытыми вертикально-ориентированными порами //Материалы пятой Международной научной конференции «Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур», 12-14 октября 2011 г., г. Харьков: НФТЦ МОНМС и НАН Украины. - 2011. – Т. 2, – С. 436-439.

27. Синёв И.В., Смирнов А.В., Гребенников А.И., Симаков В.В., Кисин В.В. Влияние предварительного циклического изменения температуры на распознавание тонкопленочными полупроводниковыми сенсорами наличия примеси паров аммиака в воздухе //Тезисы докладов VIII всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика», 3-5 сентября 2013 г., г. Саратов, - Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2013. – С. 209-210.

28. Синёв И.В., Смирнов А.В., Кисин В.В., Гребенников А.И., Симаков В.В. Влияние газовыделения изоляции электрических проводов на отклик мультисенсорной микросистемы на основе тонкой пленки диоксида олова //Тезисы докладов VIII всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика», 3-5 сентября 2013 г., г. Саратов, - Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2013. – С. 211-212.

29. Синёв И.В., Смирнов А.В., Гребенников А.И., Симаков В.В. Влияние термоциклирования на воспроизводимость температурной зависимости проводимости наноструктурированных плёнок SnO₂ //Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2013. – Вып. 5. – С. 296-300.