

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Синёва Ильи Владимировича «Температурная зависимость сопротивления тонкопленочных резисторов на основе диоксида олова» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Диссертационная работа посвящена исследованию температурной зависимости сопротивления тонкопленочных резисторов на основе плёнок диоксида олова.

Сенсоры газа на основе тонких пленок оксидов металлов нашли широкое применение в технике. Наиболее распространенным материалом для чувствительного слоя таких сенсоров является диоксид олова. Этот материал наиболее хорошо изучен, однако, в научной литературе имеется ряд дискуссионных вопросов, касающихся механизмов взаимодействия адсорбатов с поверхностью диоксида олова. Одной из важнейших характеристик сенсора является температурная зависимость сопротивления. Это связано с тем, что принцип действия полупроводниковых сенсоров газа основан на изменении их сопротивления при изменении газового состава окружающей среды. Но изменение температуры тонкой плёнки диоксида олова также влияет на ее сопротивление. Таким образом, знание температурной зависимости сопротивления, с одной стороны, важно для правильного выбора рабочего режима сенсора, с другой стороны температурная зависимость сопротивления отражает физические процессы, происходящие в объеме и на поверхности полупроводникового слоя. Поэтому углубление знаний о температурной зависимости сопротивления тонкой пленки диоксида олова, выявление процессов, определяющих эту характеристику, математическое моделирование зависимости сопротивления от температуры являются актуальными задачами, как с практической точки зрения, так и с точки зрения фундаментальной науки.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 209 страниц.

Во введении оценена актуальность выбранной темы работы, приведены цели и задачи исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор научных работ, посвященных теме исследования. Приведены основные сведения о механизмах газочувствительности тонких пленок оксидов металлов, особенностях адсорбции частиц кислорода, воды и примесных газов на поверхности оксидов металлов, технологиях получения газочувствительных слоёв. Показано, что в литературе существуют альтернативные взгляды на механизмы адсорбции кислорода на поверхности диоксида олова, и причины возникновения локального максимума на температурной зависимости проводимости тонких плёнок диоксида олова.

Во второй главе описана технология получения тонких плёнок диоксида олова, приведены результаты измерения их характеристик. Описано устройство газочувствительной мультисенсорной микросистемы. Представленные в главе результаты свидетельствуют о том, что полученные образцы имеют параметры на уровне серийно производимых в мире сенсоров газа. Отдельно рассмотрено устройство программно-аппаратного комплекса для исследования электрофизических свойств газочувствительных резисторов, оценены погрешности измерения.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования свойств полученных образцов. Исследована температурная зависимость сопротивления тонкой плёнки диоксида олова, как в атмосфере сухого воздуха, так и при различных уровнях относительной влажности. Показано, что температурная зависимость проводимости во влажном воздухе имеет немонотонный характер, и при температурах порядка 330-360°C наблюдается максимум проводимости. В сухом воздухе наблюдается уменьшение наклона кривой в том же диапазоне температур. Обнаружено,

что увеличение влажности вызывает рост проводимости в температурном диапазоне 150-450°C. При этом, при относительной влажности выше 50% наблюдается насыщение зависимости проводимости от влажности. Из динамики изменения проводимости при изменении состава окружающей среды следует, что характер указанной зависимости обусловлен как минимум двумя процессами с разными характерными временами.

В четвертой главе разработана оригинальная математическая модель, описывающая зависимость проводимости тонкоплёночного металлоксидного сенсора газа от температуры. Модель основывается на приведенных в первой главе представлениях о механизме электропроводности тонких плёнок диоксида олова в кислородосодержащей окружающей среде. Показано, что для описания основных особенностей температурной зависимости проводимости тонкой плёнки диоксида олова в атмосфере сухого и увлажненного воздуха достаточно учесть при расчетах один тип центров адсорбции на поверхности. Однако описать зависимость сопротивления сенсора от относительной влажности окружающей среды не удаётся. Указанный недостаток модели устраняется, если принять в расчет конкуренцию частиц воды и кислорода за места адсорбции на поверхности диоксида олова. В соответствии с представлениями о строении поверхности диоксида олова, на поверхности существует как минимум три типа центров адсорбции. Введение в математическую модель этих центров адсорбции приводит к расчетным результатам, которые удовлетворительно описывают экспериментальные данные. Особое внимание в главе уделено алгоритму подбора параметров математической модели. Показано, что в различных температурных диапазонах преобладают различные процессы, обуславливающие температурную зависимость проводимости. Исходя из этого, предложен алгоритм, основанный на последовательном определении параметров с последующей их коррекцией.

В пятой главе представлены экспериментальные результаты по улучшению стабильности базовой линии сопротивления газочувствительного

резистора на основе диоксида олова. Показано, что предварительная подготовка сенсора с помощью термоциклирования снижает дрейф базовой линии, что приводит к увеличению расстояния между классами «воздух» и «аммиак» при распознавании паров нашатырного спирта в воздухе. Полученный результат объясняется получением замороженного высокотемпературного состояния, характеризующегося воспроизводимым заполнением центров адсорбции на поверхности диоксида олова. В этой главе также представлен способ распознавания дымов от сгорания различных органических веществ, основанный на использовании в качестве сигнала сенсора не сопротивления, а параметра, характеризующего динамику изменения сопротивления. Указанный способ позволяет повысить надежность классификации дымов с помощью линейного дискриминантного анализа.

В заключении представлены основные результаты работы.

Основные положения и выводы диссертации являются достоверными и обоснованными. Научные результаты работы подтверждаются достаточным количеством экспериментальных данных, непротиворечивостью полученных результатов и их соответствием современным научным представлениям, применением в проведенных экспериментах стандартной измерительной аппаратуры, комплексным и корректным применением в экспериментальных исследованиях общепризнанных методик, согласованностью полученных результатов с результатами других исследователей, соответствием результатов расчета экспериментальным данным, практической реализацией результатов исследований.

Однако работа не лишена недостатков, а именно:

- 1) В пятой главе ошибочно дана ссылка на рисунок 5.1.
- 2) В литературном обзоре не упомянуты работы N. Yamazoe и соавторов 2013 года, тема которых близка к теме исследования.
- 3) Неоднообразно оформлены некоторые графики.

4) Присутствуют грамматические ошибки, например, стр. 18, строки 13 и 16 сверху; стр. 64, строки 2, 5 и 8 сверху, и др.

5) Не совсем ясно, что подразумевается под относительной влажностью окружающей среды, и какой температуре она соответствует.

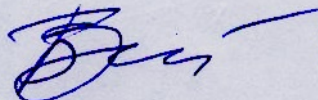
Указанные недостатки не являются принципиальными и позволяют судить о диссертационной работе как о законченном научном исследовании. Статьи, отражающие основные выводы и результаты диссертации, опубликованы в изданиях, включенных в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук». Материалы диссертации прошли широкую апробацию на научных всероссийских и международных конференциях. Практические результаты работы могут быть полезны при создании наноструктурированных тонких плёнок полупроводниковых материалов, определении оптимального рабочего режима полупроводниковых сенсоров газа, при построении алгоритмов обработки сигналов мультисенсорных систем анализа газовых смесей. Газочувствительные полупроводниковые слои представляют существенный интерес для управления граничными условиями в пьезоэлектрических резонаторах и акустических линиях задержки при разработке соответствующих сенсоров газа и биосенсоров. Однако для таких применений требуется снижение рабочей температуры газочувствительного слоя, по крайней мере, до 150 °С. Поэтому исследования, начатые в диссертации в направлении изучения механизмов низкотемпературной газочувствительности оксидов металлов, являются весьма актуальными.

Диссертация «Температурная зависимость сопротивления тонкоплёночных резисторов на основе диоксида олова» соответствует паспорту специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» в пункте 1 «Разработка и исследование физических


принципов создания новых и совершенствования традиционных приборов твердотельной электроники, изделий микро- и нанoeлектроники, включая преобразователи физических величин (сенсоры), пункте 4 «Разработка и исследование физических и математических моделей изделий» и удовлетворяет требованиям пункту 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Считаю, что автор диссертации Синёв Илья Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01.

Заведующий лабораторией физической акустики Саратовского филиала института радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН,

доктор физ.-мат. наук, профессор
410019 г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38
Телефон (8452) 27-24-01
E-mail: zai-boris@yandex.ru

 Б.Д. Зайцев

Подпись сотрудника Саратовского филиала
Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
Зайцева Б.Д. подтверждаю
Заместитель директора по научной работе
СФ ИРЭ РАН, доктор физ.-мат. наук,
профессор

 Н.И. Синицын

