

## Отзыв

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

Тонкие полупроводниковые пленки на основе диоксида олова в настоящее время являются основным материалом для изготовления твердотельных сенсоров газов, однако точные механизмы взаимодействия адсорбируемых молекул газов с поверхностными состояниями этих пленок до сих пор не известны. Поэтому исследования процессов, определяющих вид температурной зависимости сопротивления и создание физических моделей температурной зависимости проводимости и взаимодействия газов с поверхностью пленок, являются актуальными.

В результате выполнения диссертации разработана новая оригинальная модель проводимости резистивного сенсора газов на основе тонкой пленки диоксида олова, количественно описывающая зависимость проводимости пленки от температуры и влажности воздуха. Модель базируется на физически обоснованных предположениях о механизмах взаимодействий поверхностных состояний пленки с гидроксильными группами паров воды и сменой форм адсорбции кислорода на поверхности полупроводника при росте температуры.

Практическую значимость имеет предложенная в диссертации методика расчета температурной зависимости проводимости резистивных сенсоров газа на основе диоксида олова с учетом физико-химических параметров активного слоя сенсора и окружающей среды, температурного и электрического режимов работы сенсора. Использование предложенных автором методик расчета, в конечном счете, может привести к улучшению качества анализа многокомпонентных газоздушных смесей.

Диссертация содержит 209 страниц и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 277 наименований источников.

В первой главе рассмотрены основные модели взаимодействия кислорода воздуха и газов-восстановителей с поверхностными состояниями полупроводниковой пленки диоксида олова. Также анализируются существующие математические модели температурной зависимости газовой чувствительности пленок SnO<sub>2</sub>.

Во второй главе описана методика синтеза пленок SnO<sub>2</sub> с помощью магнетронного распыления керамических мишеней на переменном токе и измерение их электрических и газочувствительных параметров на автоматизированном измерительном стенде. Автоматизация измерений и использование современных измерительных приборов обеспечивают достоверность полученных в диссертации экспериментальных результатов.

Экспериментальные исследования температурной зависимости электропроводности пленок SnO<sub>2</sub> и влияние на эти измерения влажности воздушной среды выполнялись и описаны в третьей главе. На основании полученных экспериментальных данных определены условия измерения параметров образцов, близкие к стационарным, а также предложена методика термообработки образцов для стабилизации вида температурной зависимости проводимости.

Наибольший интерес представляет четвертая глава, в которой представлена математическая модель основных процессов, определяющих температурную зависимость проводимости пленок диоксида олова в атмосфере, содержащей кислород и пары воды. В рамках модели плоских зон представлена система уравнений, описывающая стационарную концентрацию свободных носителей заряда в пленке.

Уравнения учитывают наличие на поверхности образца одного, двух и трех типов центров адсорбции. Полученная система уравнений проанализирована с помощью численных методов, а в некоторых случаях – аналитически. Показано, что влияние влажности на температурную

зависимость электропроводности можно описать только моделью, учитывающей все три типа центров адсорбции. Этот результат не противоречит современным представлениям о процессах адсорбции и десорбции молекул газов на поверхности пленок  $\text{SnO}_2$ , а расчетные кривые хорошо совпадают с экспериментальными результатами.

Пятая глава посвящена проблеме распознавания запахов на основе анализа отклика мультисенсорной системы. Предложен метод повышения стабильности сопротивления сенсора и воспроизведения газового отклика, основанный на замораживании высокотемпературного заполнения поверхности адсорбированными частицами. Наглядной иллюстрацией предложенной методики является эксперимент по распознаванию дымов от сгорания объектов разного состава.

Таким образом, достоверность экспериментальных результатов можно считать довольно высокой, а сделанные на основании эксперимента выводы достаточно обоснованными. Содержание диссертации отражено в автореферате, а также в статьях, 10 из которых представлены в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций.

К сожалению, диссертация не лишена недостатков:

1. Применение предложенной математической модели ограничивается условием плоских зон, что далеко не всегда реализуется на практике.

2. Математическая модель предполагает, что зерна в пленке полностью обеднены. Чтобы применить модель к исследованным образцам, необходимо сравнить дебаевскую длину экранирования  $L_D$  с радиусом зерна  $R$ , о чем нет сведений в диссертации.

3. В диссертации отсутствуют сведения о контроле относительной влажности воздуха, хотя на графиках (рис. 3.9) присутствуют значения RH от 0% до 100%.

4. В диссертации использовалась керамическая мишень состава  $\text{SnO}_2 + 2\%\text{CuO}$ . Как влияют  $2\%\text{CuO}$  на результаты эксперимента? Возможно, для чистоты эксперимента следовало бы использовать мишень из  $\text{SnO}_2$  без примесей.

5. В тексте диссертации имеются опечатки и неточности: нет нумерации страниц 155-159; на странице 167 вместо рисунка 5.1 а, б ошибочно дана ссылка на рисунок 2.11 а, б; на многих графиках используются одновременно обозначения температуры в °С и в К и др.

Однако, указанные замечания не влияют на основные результаты и выводы диссертации, не снижают их научную и практическую значимость.

Считаю, что по актуальности темы, новизне полученных результатов, их научной и практической значимости, работа «Температурная зависимость сопротивления тонкопленочных резисторов на основе диоксида олова» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах», а её автор Синёв Илья Владимирович заслуживает искомой степени.

Заведующий кафедрой полупроводниковой  
электроники и нанoeлектроники Воронежского  
государственного технического университета,  
Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор ф.-м. наук, профессор  
394026, г. Воронеж, Московский пр., 14,  
Телефон (473)243-76-95  
E-mail: rembeza@yandex.ru

С.И. Рембеза

