

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор НИУ «МЭИ» д. т. н.



 Драгунов В. К.

«06» 06 2022 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Гхариб Дина Али Ахмед «Электрофизические и сенсорные свойства полупроводниковых пленок PdO для селективного детектирования озона», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников

В настоящее время озон широко используется для обеззараживания воды в водопроводах, бассейнах, аквапарках, очистки стоков, отбеливания бумаги и других областях деятельности человека. При этом озон является одним из самых токсичных газов. Предельно допустимая концентрация ПДК озона в воздухе рабочей зоны составляет –  $0.1 \text{ мг/м}^3$  или  $\sim 50 \text{ ppb}$ . Поэтому для обеспечения техники безопасности в местах, где получают и используют озон необходимо проводить непрерывный и многоточечный контроль его содержания в окружающей атмосфере.

В большинстве случаев эта задача решается с помощью приборов, основанных на оптическом принципе детектирования. Однако эти приборы имеют высокую стоимость, энергопотребление и габаритные размеры оптических датчиков.

Альтернативой являются приборы на основе полупроводниковых сенсоров резистивного типа, основные преимущества которых заключаются в дешевизне и простоте их изготовления, низком энергопотреблении, возможности многоточечного и непрерывного мониторинга воздуха рабочей зоны. Датчики

таких приборов изготавливаются на основе полупроводниковых оксидов. Они имеют широкие возможности для миниатюризации и формирования на их основе многоточечных газосенсорных сетей. Выбор материала газочувствительного слоя, как и технология его изготовления во многом определяют характеристики сенсора.

Именно этими обстоятельствами обусловлены **актуальность, теоретическое и практическое значение** выбранной темы диссертации Гхариб Дины Али Ахмед, посвященной исследованию особенностей электрофизических и сенсорных свойств тонких пленок PdO различной толщины и оптимизации технологии изготовления сенсоров на основе PdO для обеспечения возможности детектирования озона ниже уровня ПДК и повышения их селективности.

По результатам анализа диссертационной работы можно сделать вывод о том, что поставленная цель была достигнута, автору в значительной степени, удалось выявить особенности электрофизических и сенсорных свойств тонких пленок PdO различной нанометровой толщины и оптимизировать технологии изготовления сенсоров на основе этого материала. Задачи исследования, необходимые для достижения поставленной цели, решены в полном объеме:

1. Разработаны режимы и технология получения тонкопленочных образцов PdO двух нанометровых толщин, обеспечивающие воспроизводимое детектирование озона на уровне ниже ПДК.
2. Разработана методика объемного легирования сенсоров и получены соответствующие образцы.
3. Разработана методика измерения различных концентраций озона полупроводниковыми сенсорами PdO, проведены сравнительные измерения озона образцами PdO двух толщин.
4. Определены структура, фазовый состав, оптические, электрофизические и сенсорные свойства полученных образцов.
5. Установлена взаимосвязь между структурой сенсоров на основе PdO, способами их приготовления и газочувствительными свойствами по отношению к озону.

6. Сравнительный анализ газового отклика сенсоров на основе PdO при различных стационарных температурах позволил установить оптимальные значения температур, обеспечивающих одновременно высокие значения резистивного отклика и его кинетики, и определить возможности повышения селективности анализа озона при работе в нестационарном термическом режиме.

**Основные результаты работы** заключаются в следующем:

1. Определена оптимальная температура окислительного отжига нанослоев металлического палладия двух толщин (30 и 90 нм), лежащая вблизи 550 °С, при которой происходит образование ультратонких полупроводниковых пленок оксида палладия PdO с шириной запрещенной зоны 2,27 и 2,21 эВ соответственно, и обеспечивающая их состав и субструктуру, пригодные для воспроизводимых резистивных измерений.

2. Показано, что увеличение температуры окислительного отжига выше 550 °С, приводит к фрагментации полупроводниковых пленок PdO и появлению электрических шумов в процессе резистивных измерений.

3. Установлено, что полупроводниковые пленки PdO разной толщины (30 и 90 нм) показывают различные газочувствительные свойства и могут применяться при селективном детектировании озона как в широкой концентрационной области (90 нм), так и в области малых концентраций озона (30 нм), существенно ниже 25 ppb.

4. Определена рабочая температура тонкопленочных сенсоров на озон в стационарных условиях, обеспечивающая оптимальные характеристики «резистивный отклик-кинетика».

5. Обнаружены особенности резистивного отклика сенсоров PdO в режиме переменной температуры, позволяющие обеспечивать повышение селективности сенсоров при анализе озона.

**Теоретическая и практическая значимость** диссертационной работы заключаются в том, что результаты ее исследований не только расширяют представления о физической природе процессов формирования наноразмерных пленок оксида палладия, чувствительных к содержанию озона в окружающей

среде, но и реализованы в опытных образцах и протестированы в различных газовых средах. В результате показана возможность их использования в устройствах типа «электронный нос».

Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе в процессе изучения раздела «Физика полупроводников» при подготовке бакалавров, магистрантов, аспирантов и специалистов в области физики полупроводников, твердотельной электроники, нанотехнологий и сенсорики.

### **Замечания**

1. Недостатком литературного обзора (глава 1 диссертации) является слишком большая концентрация внимания на механизмах адсорбции газов, конструкции и изготовлении сенсоров на оксидных полупроводниках, в ущерб детальному представлению электрофизических и сенсорных свойств тонких пленок PdO и предшествующим экспериментам с их использованием в полупроводниковых детекторах газов.

2. В Главе 2 «Методика эксперимента» детально представлены технологии получения тонких пленок PdO двух разных толщин и способы измерения их сенсорных свойств. Однако даже не перечислены другие экспериментальные методы характеристики этих пленок и аппаратура, которые использовались в работе: рентгеновская дифракция, электронная микроскопия, рентгеноэлектронная спектроскопия, оптическое поглощение.

3. В Главе 3 Рисунок 22 иллюстрирует появление сильных электрических шумов в процессе резистивных измерений на фрагментированных пленках, полученных при увеличении температуры окислительного отжига до 570°C, но при этом почему-то не приводит картину шумов при оптимальной температуре отжига.

### **Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения присуждении ученых степеней**

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа Гхариб Дины Али Ахмед, посвященная исследованию особенностей электрофизических и сенсорных свойств тонких пленок PdO и оптимизации технологии изготовления сенсоров на основе PdO, соответствует пункту 9 Положения о присуждении

ученых степеней (от 24 сентября 2013 года №842 с изменениями на 2 августа 2016 года), является самостоятельной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, направленной на исследование особенностей электрофизических и сенсорных свойств тонких пленок PdO различной толщины и оптимизации технологии изготовления сенсоров на основе PdO для обеспечения возможности детектирования озона ниже уровня ПДК и повышения их селективности, что представляет несомненный теоретический и практический интерес для физики полупроводников.

Представленные в диссертационной работе основные результаты и выводы обладают **научной аргументацией, практической значимостью полученных результатов**, подкреплены как полученными экспериментальными данными, так и сопоставимостью с результатами других работ, в частности, широко представленных самыми последними данными, опубликованными в ведущих зарубежных изданиях.

Работа содержит достаточное количество иллюстраций, что облегчает восприятие результатов по особенностям электрофизических и сенсорных свойств тонких пленок PdO различной толщины и оптимизации технологии изготовления сенсоров на основе PdO и подтверждает сделанные выводы. Основные научные результаты диссертации были своевременно и в полном объеме опубликованы в 5-ти статьях в рецензируемых научных журналах, в том числе в индексируемых в системах WoS и SCOPUS и докладывались на Всероссийских конференциях.

В целом, изложенный в диссертационной работе материал, представлен на достаточно хорошем научном уровне, имеет четко выраженную доказательность. Каждая глава завершается выводами, акцентирующими внимание на основных положениях, представленных к защите. Диссертация представляет самостоятельный труд, дающий полное представление, как о состоянии проблемы физики и технологии сенсорной свойств тонких полупроводниковых слоев оксида палладия наноразмерной толщины, так и о научных результатах, полученных автором работы. Тема диссертации полностью соответствует выбранной научной специальности. Автореферат в полной мере отражает основное содержание

диссертации. На основании вышеизложенного полагаем, что Гхариб Дина Али Ахмед заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Диссертационная работа и автореферат Гхариб Дины Али Ахмед рассмотрены и одобрены на расширенном научном семинаре кафедры электроники и нанoeлектроники Национального исследовательского университета «МЭИ» (протокол № 5 от 01 06 2022 года).

Зав. кафедрой ЭиН  
д.т.н. профессор



Ирина Николаевна Мирошникова

Ученый секретарь кафедры ЭиН  
к. т. н. доцент



Ольга Борисовна Сарач

111250 Москва, Красноказарменная ул. 14  
тел. +7 495 362 7168  
e-mail: universe@mpei.ac.ru