

ОТЗЫВ

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

Диссертация Гхариб Дины Али Ахмед посвящена исследованию газосенсорных свойств широкозонных оксидных полупроводников, которые применяются для анализа сверхнизких концентраций озона в воздухе. В работе были использованы, как хорошо известные для детектирования озона оксиды - ZnO, NiO, WO₃, так и ранее не применявшийся в газовой сенсорике оксид PdO. Ему была посвящена основная часть работы. В сравнительных исследованиях сенсорных свойств PdO с вышеупомянутыми оксидами обнаружены его существенные преимущества по селективности при детектировании озона. В диссертации описаны способы получения тонко- и толстопленочных образцов PdO, проведена детальная характеристика образцов, в том числе неразрушающими методами: рентгеновской дифракции, оптической спектроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, просвечивающей микроскопией, дифракции быстрых электронов. Газосенсорные свойства PdO изучены при постоянной температуре и в режиме термомодуляции. В диссертации показано, что в режиме термомодуляции резистивный отклик PdO имеет существенные особенности, что позволяет решать задачи селективного детектирования озона.

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что озон в настоящее время используется во многих современных технологических процессах, например, для обеззараживания воды в водопроводах, бассейнах, аквапарках, очистки стоков, отбеливания бумаги и т.д.. Однако, озон является одним из самых токсичных газов применяемых в промышленности. Поэтому для обеспечения техники безопасности в местах, где используют

озон необходимо проводить непрерывный и многоточечный контроль его содержания в окружающем воздухе. Исходя из этого **целью работы** являлось исследование особенностей электрофизических и сенсорных свойств пленок PdO различной толщины и оптимизация технологии изготовления сенсоров на основе PdO для обеспечения возможности детектирования озона ниже уровня ПДК (предельно допустимой концентрации рабочей зоны) и повышения их селективности.

Научно-квалификационная работа состоит из введения, шести глав и выводов по каждой из этих глав, а также обобщающего вывода по всей представленной диссертационной работе. Объем научно-квалификационной работы составляет 121 страницу, которая включает 58 рисунков, 3 таблицы, список литературы, содержащий 135 наименований.

Основными и новыми результатами работы являются:

-Впервые систематически изучен новый сенсорный материал PdO в части температурной зависимости его резистивного отклика на озон.

-Впервые обнаружено, что при работе PdO сенсоров в нестационарном термическом режиме (синусоидальное изменение температуры 50-300-50 °С) наблюдается характерная немонотонная особенность резистивного отклика, которая позволяет решать задачу селективного анализа озона.

-Впервые установлена взаимосвязь между температурными режимами формирования чувствительных слоев сенсоров на основе PdO с их морфологией. Установлено, что тонкие пленки PdO, полученные путем окисления слоев металлического Pd, рекристаллизуются и фрагментируются при окислительном отжиге, что является причиной электрических шумов несплошных пленок PdO. Определены температурные режимы окислительного отжига Pd позволяющие изготавливать сенсоры озона на основе тонких пленок PdO без резистивных шумов.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты расширяют представления о физических и физико-химических процессах, происходящих при формировании тонких пленок PdO,

адсорбционно-десорбционных процессах на них и взаимодействии адсорбированных газов с электронной подсистемой полупроводника. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для изготовления сенсоров озона и аналитических приборов на их основе с чувствительностью ниже ПДК для этого газа и повышенной селективностью к озону.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, изложенных в диссертации, обеспечивается комплексом взаимодополняющих друг друга современных экспериментальных методов и корректным их использованием; воспроизводимостью характеристик исследуемых объектов, многократной экспериментальной проверкой результатов измерений, использованием метрологически аттестованной измерительной техники; сопоставлением и непротиворечивостью полученных экспериментальных результатов и имеющихся литературных данных.

Текст автореферата в полной мере отражает содержание диссертации. Выносимые на защиту положения соответствуют основным результатам и выводам работы. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в том числе входящих в список изданий, рекомендованных ВАК. Содержание диссертации, приведенных результатов, сделанных выводов и выдвигаемых на защиту положений соответствует указанной специальности 1.3.11 – Физика полупроводников. Тем не менее, к соискателю имеются некоторые **замечания**:

- 1) В литературном обзоре большое внимание уделено общим вопросам и механизмам газовой чувствительности полупроводниковых сенсоров, а так же методам и технологиям их получения. В тоже время недостаточное внимание уделено обзору по конкретным вопросам, а именно: сенсорам озона, что в контексте диссертации было бы более полезным.
- 2) В главе 5.1 представлены экспериментальные данные по газосенсорным свойствам толстопленочных сенсоров PdO и PdO+SiO₂.

Установлено, что сенсор PdO с добавками 3 весовых % аэрогеля SiO₂ обладает существенно лучшими характеристиками – величиной и кинетикой отклика по сравнению с PdO сенсором. Обсуждения этого интересного факта в главе не содержится.

- 3) В диссертации (глава 6) впервые обнаружена особенность резистивного отклика сенсора PdO, работающего в нестационарном термическом режиме. Безусловно, такое необычное поведение сенсора PdO может быть использовано в решении задачи селективного детектирования озона. Для других изученных сенсоров (ZnO, NiO) эта особенность не наблюдается. Причины такого поведения сенсоров ZnO и NiO, к сожалению, не обсуждаются, что могло бы усилить впечатление от представленной работы.
- 4) В диссертации присутствует ряд неточностей в оформлении, описок и неудачных выражений. По тексту работы наблюдаются ошибки и неоднозначность в оформлении заголовков и рисунков. В частности: на стр. 78 ошибка в названии главы; на стр. 85 два рисунка имеют одинаковую нумерацию

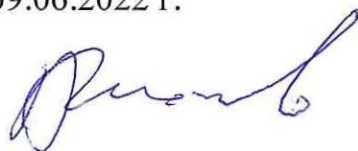
Следует отметить, что диссертация производит хорошее впечатление, несмотря на сделанные замечания, которые не ставят под сомнение новизну и значимость выносимых на защиту положений и выводов. Результаты, полученные автором, обладают высокой научной и практической значимостью и будут востребованы при дальнейших фундаментальных исследованиях и прикладных разработках. С уверенностью можно сказать, что диссертация Гхариб Дины Али Ахмед представляет собой выполненное на высоком уровне законченное научно-квалификационное исследование.

Заключение по работе. Таким образом, считаю, что диссертация «Электрофизические и сенсорные свойства полупроводниковых пленок PdO для селективного детектирования озона» по своей актуальности и новизне, достоверности и совокупности полученных результатов, уровню их апробации соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским

диссертациям, в том числе критериям, установленным в п. 9 - 14 положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г. (с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 11 сентября 2021 г. №1539), а её автор, Гхариб Дина Али Ахмед, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Согласен на обработку моих персональных данных

09.06.2022 г.



Официальный оппонент

Чистяков Виктор Владимирович

кандидат физико-математических наук

(специальность 02.00.04 Физическая химия)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Лаборатория физики редкоземельных полупроводников Отделения физики диэлектриков и полупроводников, старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии,

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Телефон: +79818157495

E-mail: v.chistyakov@mail.ioffe.ru



Подпись Чистякова В.В. достоверную
дел. отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе

ЧВБ



Подпись уполномоченной
Линой Сарасари
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

М.И.