

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 34.01.02  
ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ  
УЧРЕЖДЕНИИ НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ  
ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 26.11.2020 №13

О присуждении Шутаеву Вадиму Аркадьевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Создание и исследование сенсора водорода на основе диодной структуры **Pd/Оксид/InP**» по специальности 01.04.10 – физика полупроводников принята к защите 24 сентября 2020 г., протокол №9 диссертационным советом 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки (ФГБУН) Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75.

Соискатель Шутаев Вадим Аркадьевич, 1984 года рождения, в 2016 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого по специальности «Электроника и микроэлектроника». С 2016 по 2020 годы соискатель проходил обучение в аспирантуре ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В настоящее время соискатель работает в должности и.о. младшего научного сотрудника в Лаборатории инфракрасной оптоэлектроники Центра физики наногетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Научный руководитель – Гребенщикова Елена Александровна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории инфракрасной оптоэлектроники Центра физики наногетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

**1. Зубков Василий Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор Кафедры микро- и нанозлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);

**2. Мынбаев Карим Джафарович**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий Лабораторией фотоэлектрических явлений в полупроводниках, ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО СПбПУ, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29) – в своем положительном заключении, подписанном директором Высшей инженерно-физической школы СПбПУ, доктором физико-математических наук, доцентом Журихиной Валентиной Владимировной и утвержденным проректором по научной работе ФГАОУ ВО СПбПУ, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом Российской академии наук, профессором Сергеевым Виталием Владимировичем, отметила, что диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена важная научная и практическая задача создания быстрodeйствующего сенсора водорода.

В отзыве содержится 5 замечаний:

1. В работе показано, что скорость спада фототока зависит от концентрации водорода в газовой смеси. Однако в работе отсутствует описание механизма гашения сигнала фототока при подаче водорода на структуру.

2. На рис. 3.29 диссертации изображена эквивалентная схема структуры Pd/Оксид/InP, где емкости оксидного слоя  $C_1$  и барьерная емкость слоя обеднения  $C_2$  в InP включены последовательно, а эта цепочка включена параллельно сопротивлению слоя объемного заряда InP  $R_2$ . Как это можно объяснить, если исходить из соображений геометрии структуры?

3. При определении показателя поглощения из спектров пропускания пленок палладия не ясно, учитывалось ли отражение от этих пленок.

4. В работе обнаружена зависимость постоянной Ричардсона от концентрации водорода, но отсутствует объяснение причин этого явления.

5. В работе имеются элементы небрежного оформления. Так, например, напряжение обозначается разными буквами U и V. В тексте диссертации имеются стилистические погрешности.

Указанные недостатки не являются принципиальными, не противоречат всем основным результатам и выводам, сформулированным в работе, и не уменьшают, тем самым, научную и практическую значимость проведенного В.А. Шутаевым исследования. Результаты диссертации представлены на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в семи статьях в реферируемых журналах и в трех патентах.

Уровень диссертации соответствует всем требованиям Положения Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель, Шутаев Вадим Аркадьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловлен их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На все замечания соискателем даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

На автореферат поступило 6 отзывов, все они положительные.

1. Отзыв доктора технических наук, заведующего лабораторией полупроводниковых и диэлектрических материалов, ИОНХ РАН, Лауреата Государственной премии СССР, профессора Васильева Михаила Григорьевича (119991, Москва, Ленинский проспект 31). Отзыв положительный, без замечаний.

2. Отзыв кандидата физико-математических наук, заведующего Отделом Диодной лазерной спектроскопии, ИОФ РАН, Понуровского Якова Яковлевича (119991, Москва, ул. Вавилова, 38). Отзыв положительный, без замечаний.

3. Отзыв доктора физико-математических наук, заведующего Центром «Лазерной техники и технологии» Института физики НАН Беларуси, Рябцева Геннадия Ивановича и доктора физико-математических наук, заведующего Центром «Полупроводниковых технологий и лазеров» Института физики НАН Беларуси Яблонского Геннадия Петровича (220072, Республика Беларусь, Минск, просп. Независимости, 68). Отзыв положительный, без замечаний.

4. Отзыв доктора физико-математических наук, заведующего отделом Института физики полупроводников НАН Украины, профессора, члена-корреспондента НАН Украины Сизова Федора Федоровича (03028, Украина, Киев, просп. Науки, 41). Отзыв положительный, замечаний нет.

5. Отзыв доктора физико-математических наук, профессора кафедры «Физической химии», ФФГАОУ ВО «СПбГТУ «ЛЭТИ» Кузнецова Владимира Владимировича (197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5). Отзыв положительный, имеет замечания:

а) Из автореферата нельзя понять заявленную автором технологию получения рассматриваемых структур. Так, не определены кинетика анодного окисления, влияние состава рН электролита на фазовый состав аморфного слоя на поверхности InP и т.д.

б) Нельзя не указать автору на небрежность, проявленную при написании автореферата. Например, три позиции научной новизны продублированы почему-то в научных положениях.

в) Автор не привел доказательств достоверности полученных результатов.

г) Использование научного жаргона не украшает текст и его автора: «работа выхода палладия», «высота барьера в структуре», «высокая энергия образования химической связи на границе раздела...»... и т.д.

Указано, что сделанные замечания не снижают хорошего общего впечатления о работе.

6. Отзыв доктора физико-математических наук, главного специалиста НИЦ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», профессора Дирочки Александра Ивановича (111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/2 ОАО «НПО «Орион»). Отзыв положительный, замечаний нет.

Диссертационный совет отмечает, что на **основании выполненных соискателем исследований** решен комплекс задач, которые являются актуальными для области физики полупроводников в целом и диодных структур на фосфиде индия в частности.

1. Проведено исследование влияния водорода на сигнал фотоответа в структурах Pd/InP и Pd/Оксид/InP. Изучен характер зависимости скорости изменения фотоответа от концентрации водорода.

2. Установлены механизмы проводимости в структурах Pd/InP и Pd/Оксид/InP и их смена при изменении концентрации водорода в газовой смеси.

3. Предложена модель RC-цепочки для описания электрофизических характеристик структур Pd/Оксид/InP в воздушной среде и в атмосфере водорода.

4. Установлен характер зависимости изменения высоты энергетического барьера в структурах Pd/InP и Pd/Оксид/InP от концентрации водорода. Определен диапазон количественных измерений концентраций водорода.

5. Изучены вольт-фарадные характеристики структур Pd/Оксид/InP в воздушной среде и в атмосфере водорода на разных частотах. Определен механизм гистерезиса вольт-фарадных характеристик структур Pd/Оксид/InP в атмосфере водорода.

**Практическая значимость работы состоит в следующем:**

1) Показано, что наличие оксидного слоя в структурах Pd/Оксид/InP приводит к повышению фотоэдс и повышению чувствительности фотоэлектрического метода

детектирования водорода, соответственно. Структуры с промежуточным оксидным слоем позволяют расширить интервал рабочих температур сенсора.

2) Определен диапазон толщин пленок палладия, устойчивых к воздействию водорода и обеспечивающих высокую фоточувствительность структуры Pd/Оксид/InP при детектировании водорода.

3) Разработана архитектура структуры Pd/Оксид/InP, в которой на подложке InP последовательно сформированы слои анодного оксида и палладия, ограниченные по периметру диэлектриком Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> для снижения поверхностных токов утечки. Омический контакт к каталитическому металлу палладию имеет крестовидную форму для равномерного растекания тока по поверхности палладия.

4) На основе полученных научных результатов создан макетный образец оптоэлектронного сенсора водорода на основе структуры Pd/Оксид/InP для количественного определения концентрации водорода в диапазоне 0,1-100 об.%.

Диссертация является законченным, последовательным и внутренне согласованным научным трудом, имеющим как фундаментальное, так и прикладное значение.

#### **Достоверность и надежность результатов.**

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим согласием между экспериментальными данными, полученными разными методами. Также достоверность результатов подтверждается согласованностью теоретических расчетов и результатов экспериментов. Результаты работы опубликованы в авторитетных рецензируемых журналах.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы многократно обсуждались на российских и международных конференциях:

1. Международная молодёжная конференция Физика (Санкт-Петербург, 2015).
2. Международная научно-практическая конференция «Sensorica» (Санкт-Петербург, 2015).
3. 17-я всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2015).
4. Международная зимняя школа по физике полупроводников, (Санкт-Петербург – Зеленогорск, 2016).
5. 18-я всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2015).
6. 30th Eurosensors Conference (Budapest, 2016).
7. The 11th Belarusian-Russian Workshop «Semiconductor lasers and systems» (Minsk 2017).
8. 25th International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, (St Petersburg, 2017).
9. 31st Eurosensors Conference (Paris, 2017).

### **Личный вклад автора.**

Все новые результаты, сформулированные в диссертации, получены лично автором. Вклад диссертанта состоит в том, что им была собрана установка для измерения фотоэлектрических характеристик исследуемых структур, разработано программное обеспечение для управления установкой с выводом данных на компьютер. Диссертант проводил экспериментальные исследования, анализировал их результаты, формулировал выводы, участвовал в разработке технологии создания структур Pd/InP и Pd/Оксид/InP. Проводил численные расчеты, обрабатывал полученные результаты и участвовал в подготовке публикаций.

### **Публикации.**

По материалам диссертационного исследования опубликовано 7 научных статей, 10 тезисов докладов, представленных на российских и международных конференциях; получено 3 патента (2 на полезную модель, 1 на изобретение). Все статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Из них 6 - в реферируемых журналах, включенных в систему цитирования Web of Science и 1 статья - в РИНЦ. Среди опубликованных статей по теме диссертации наиболее важными являются следующие (в скобках указан личный вклад автора):

1. Е.А. Гребенщикова, Х.М.Салихов, В.Г. Сидоров, В.А. Шутаев, Ю.П. Яковлев. Определение концентрации водорода по фотоэдс МДП структур Pd-оксид-InP. // ФТП. – 2018. – т. 52, вып. 10. – С. 1183-1186. (Проведение фотоэлектрических измерений, обработка и интерпретация результатов)
2. Е.А. Гребенщикова, В.Г. Сидоров, В.А. Шутаев, Ю.П. Яковлев. Влияние концентрации водорода на фототок диодов Шоттки Pd-n-InP. // ФТП. – 2019. – т. 53, вып. 2. – С. 246-248. (Проведение фотоэлектрических измерений, обработка и интерпретация результатов)
3. Шутаев В.А., Гребенщикова Е.А., Пивоварова А.А., Сидоров В.Г., Власов Л.К., Яковлев Ю.П. Влияние водорода на электрические свойства структур палладий-фосфид индия. // ФТП. – 2019. – т. 53, вып. 10. – С. 1427-1430. (Измерение ВАХ, обработка результатов)
4. Шутаев В.А., Гребенщикова Е.А., Сидоров В.Г., Яковлев Ю.П., Влияние водорода на оптическую прозрачность слоев палладия. // Оптика и спектроскопия. – 2020. – т. 128, вып. 5. – С. 603-606. (планирование и проведение эксперимента, анализ экспериментальных данных, подготовка статьи)
5. Шутаев В.А., Гребенщикова Е.А., Сидоров В.Г., Компан М.Е., Яковлев Ю.П. Влияние водорода на импеданс структур Pd/Oxide/InP. // ФТП. – 2020. – т. 54, вып. 6, С. 547-551. (анализ экспериментальных данных, обработка результатов, подготовка статьи)
6. Патент на полезную модель №181295 «Устройство и способ определения концентрации водорода в газовой среде», приоритет изобретения 09 июля 2018, авторов: Гребенщикова Е.А., Капралов А.А., Сидоров В.Г., Шутаев В.А., Яковлев Ю.П. (планирование и проведение эксперимента, проведение расчетов, анализ экспериментальных данных, подготовка реферата)

На заседании 26 ноября 2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Шутаеву В.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении открытого голосования членами диссертационного совета в количестве 19 человек из 26 членов диссертационного совета, из них 12 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, проголосовали:

За присуждение Шутаеву Вадиму Аркадьевичу ученой степени кандидата физико-математических наук

подано голосов – 19.

Против – 0.

Недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук

Бурков Александр Трофимович

Заместитель ученого секретаря диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук

Татьяна Васильевна Шубина

26 ноября 2020 г.