

ОТЗЫВ

официального оппонента,
д.ф.-м.н. Мынбаева Карима Джафаровича,
на диссертацию

Шутаева Вадима Аркадьевича

на тему: «Создание и исследование сенсора водорода на основе диодной структуры Pd/оксид/InP»

по специальности 01.04.10 – физика полупроводников, представляемую на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

1. Актуальность избранной темы.

Актуальность темы диссертационной работы Шутаева В.А. определяется, с одной стороны, быстрым развитием водородной энергетики с характерной для неё экологичностью, эффективностью и доступностью источника энергии, а с другой – необходимостью обеспечивать безопасность хранения, транспортировки и эксплуатации водорода с учетом его высокой взрывоопасности. Потребность в сенсорах водорода, способных регистрировать утечки газа, обеспечивая безопасность эксплуатации систем водородной энергетики, весьма велика. В то же время, большинство производимых и используемых в настоящее время сенсоров водорода имеют недостатки, включая низкое быстродействие и недостаточную селективность к водороду, необходимость нагрева чувствительного элемента, сложную конструкцию, высокую стоимость или большой вес прибора. Альтернативой для таких сенсоров являются сенсоры на основе диодов Шоттки с чувствительным элементом, содержащим палладий. Металлический палладий активно абсорбирует водород, и накопление его атомов в металле сопровождается изменением ряда параметров последнего. Детектирование водорода подобными сенсорами осуществляется по изменению электрических или фотоэлектрических характеристик диодов. Однако, несмотря на большое количество исследований, посвященных изучению физики процессов, происходящих в палладий-содержащих структурах при взаимодействии с водородом, до сих пор отсутствует четкое понимание явлений, оказывающих влияние на изменение характеристик структур. Это и определяет актуальность выбранной темы диссертации, посвященной созданию и изучению характеристик сенсора водорода на основе структуры «Pd/оксид/InP».

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Все основные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации Шутаева В.А., научно обоснованы и аргументированы. Научные положения и практические рекомендации диссертационного исследования основываются на результатах и выводах, сущностная часть которых не противоречит данным исследований, опубликованных в признанных научным сообществом фундаментальных и прикладных трудах отечественных и зарубежных авторов. Обобщение полученных результатов проведено с соблюдением научной преемственности с данны-

ми, представленными в предшествующих работах по рассматриваемой теме, что подтверждается списком цитируемых работ из 70 наименований.

3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов проведённого исследования сомнений не вызывает, поскольку работы выполнены на базе ведущего научного центра страны, — ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Возможности использования самых современных методов диагностики исследуемых материалов и структур, включая электронную и атомно-силовую микроскопию, рентгенофазовый анализ, и др., и разнообразие применённых методик исследований позволили получить ряд результатов, обладающих научной новизной, подтверждённую достоверность которых отражает список публикаций автора диссертации в реферируемых отечественных научных изданиях.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Научные результаты, полученные автором диссертационной работы, относятся к области разработок газовых сенсоров – актуальному направлению современной науки. Автором диссертации были получены следующие важные результаты:

- 1) Были определены механизмы токопротекания в структурах «Pd/оксид/InP» и диодах Шоттки «Pd/InP» в воздушной среде и в атмосфере водорода: туннельный и термотуннельный. Было показано, что в атмосфере водорода туннельный механизм токопротекания становится преобладающим.
- 2) Была построена модель структур, и было показано, что она может быть представлена в виде параллельной RC-цепочки с последовательным сопротивлением, — как в воздушной среде, так и в атмосфере водорода.
- 3) Был определен диапазон толщин пленок палладия в нанометровом диапазоне, в котором пленки не разрушаются при контакте с водородом.
- 4) Для структур «Pd/оксид/InP» и диодов Шоттки «Pd/InP» был установлен экспоненциальный закон изменения фотоответа при контакте с водородом. Показано, что бóльшая величина фотоответа структур типа «Pd/оксид/InP» делает их более перспективными для создания сенсоров водорода.
- 5) Разработан опытный образец фотоэлектрического сенсора водорода.

5. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы при решении прикладных задач по созданию сенсоров водорода, фотоэлектрических газовых сенсоров в целом, а также при проведении дальнейших фундаментальных исследований по взаимодействию водорода с палладием в частности, и с металлами в целом.

6. Содержание диссертации, ее завершенность.

Структура диссертационной работы логически выдержана. Научные положения и выводы диссертации аргументированы, практическая апробация методиче-

ских разработок автора свидетельствует о высоком научном и практическом уровне выполненной работы.

Диссертация Шутаева В.А. состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы из 70 наименований. Общий объем диссертации составляет 124 страницы, она содержит 96 рисунков и 3 таблицы. На описание оригинальных исследований и разработок автора приходится около 70 страниц текста, то есть, бóльшая часть объема диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, представлены основные результаты исследований, перечислены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен очень подробный, практически исчерпывающий, обзор принципов действия, конструкций и характеристик существующих сенсоров водорода и рассмотрены их основные недостатки. Показано, что одним из самых эффективных является фотоэлектрический способ детектирования водорода с использованием структур на основе диодов Шоттки, чему и посвящена диссертационная работа.

Во второй главе приводится обоснование выбора материалов, используемых для создания сенсора, и рассматривается разработанная автором методика создания чувствительного элемента на основе диода Шоттки «Pd/InP» и структуры «Pd/оксид/InP».

В третьей главе представлены результаты комплексных исследований структур «Pd/оксид/InP» и диодов Шоттки «Pd/InP». В частности, представлены результаты измерений вольт-амперных характеристик структур в воздушной среде и в атмосфере азотно-водородной смеси с различной концентрацией водорода в интервале температур 90-300 К. Также приведены результаты измерений вольт-фарадных характеристик в воздушной среде и в атмосфере водорода при разных частотах переменного напряжения, результаты измерения фототока в диодах Шоттки при контакте структуры с водородом при комнатной температуре и результаты измерения фотоэдс в структурах «Pd/оксид/InP», также при комнатной температуре. В конце главы приведен сравнительный анализ фотоэлектрических характеристик структур «Pd/оксид/InP» и диодов Шоттки «Pd/InP» и рассмотрены перспективы создания на их основе сенсора водорода.

В заключении сформулированы основные выводы по полученным результатам диссертационной работы.

Рассмотрение содержания диссертационной работы В.А. Шутаева позволяет сделать вывод о том, что она является оригинальным завершённым научным исследованием, полностью раскрывшим заявленную тему. Содержание автореферата полностью соответствует основному содержанию диссертации.

7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации.

К достоинствам работы можно отнести:

- 1) Чрезвычайно подробный обзор принципов действия, конструкций и характеристик существующих сенсоров водорода, их основных недостатков и достоинств. Это позволяет автору строго обосновать выбор направления исследований.
- 2) Комплексное исследование свойств структур, предлагаемых к использованию в качестве сенсоров водорода, — включая исследование свойств используемых материалов и их комбинаций, и исследование электрических и фотоэлектрических характеристик структур.
- 3) Доведение научных изысканий автора до логического конца — разработку опытного образца сенсора водорода, доказавшую состоятельность предложенной концепции сенсора.

К недостаткам работы по существу можно отнести следующие:

- 1) С учетом специфики взаимодействия водорода с палладием и результатов экспериментов, представленных автором в разделе 3.3, возникает вопрос о сроке службы разрабатываемого сенсора. Для некоторых сенсоров, рассмотренных в литературном обзоре, такие данные приведены, однако для сенсора, разработанного в диссертационной работе, отсутствуют даже прогностические оценки срока службы.
- 2) Из работы не ясно, какова точность детектирования водорода при использовании разработанного сенсора. На с. 92 диссертации сказано, что «Из сравнения фотоэлектрических характеристик структур Pd/Оксид/InP и диодов Шоттки Pd/InP ясно, что с повышением величины фотоответа увеличивается чувствительность, повышаются скорость и точность детектирования водорода», однако никаких фактических сведений по точности и её зависимости (если таковая имелаась) от концентрации детектируемого водорода не дано, хотя, например, для полимерного сенсора, рассматриваемого в литературном обзоре, такие данные приведены.
- 3) Не ясен режим работы светодиода, используемого в сенсоре. Блок-схема сенсора и её описание (разделы 3.5.1 и 3.5.2) предполагают, что используется режим широтно-импульсной модуляции (ШИМ), однако никаких численных параметров для этого режима в диссертации не приводится. Не понятно, исследовалось ли влияние этих параметров на характеристики сенсора, и учитывались ли данные параметры при проведении расчетов, представленных в разделе 5.3.1.
- 4) Не приведены итоговые характеристики образца сенсора. Автор называет его «опытным образцом», что подразумевает, что такой сенсор был не только спроектирован, но и изготовлен (и на рис. 3.65 имеется фотография сенсорного модуля), однако никаких данных по его характеристикам нет.

К недостаткам оформления работы можно отнести следующие:

- 1) Автор использует русско- и англоязычные обозначения единиц измерения физических величин, как в тексте, так и на рисунках, вперемешку.
- 2) Автор приводит много избыточной, на взгляд оппонента, информации на уровне элементарных знаний, что обычно не характерно для диссертации на соиска-

ние ученой степени. Подобный стиль изложения типичен, скорее, для выпускных квалификационных работ студентов, а не для диссертации.

3) Работа не свободна от опечаток. Современные компьютерные текстовые редакторы позволяют легко решать эту проблему без скрупулёзного вычитывания текста «с бумаги», так что это тем более странно.

Указанные замечания, однако, не влияют на оценку достоверности основных полученных результатов диссертационной работы и, таким образом, на общую положительную оценку работы в целом.

8. Заключение о соответствии диссертации критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертация Шутаева Вадима Аркадьевича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи по разработке и исследованию свойств и характеристик сенсора водорода на основе диодной структуры «Pd/оксид/InP», имеющей значение для развития водородной энергетики и в целом для возобновляемой энергетики, что соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор диссертации, Шутаев Вадим Аркадьевич, безусловно заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент,
Доктор физико-математических наук,
Главный научный сотрудник – заведующий лабораторией
фотоэлектрических явлений в полупроводниках
ФТИ им. А.Ф. Иоффе
194021 Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26
Тел. +7(812)2927182,
mynkad@mail.ioffe.ru

_____ / _____ /
(подпись) (расшифровка подписи)

Дата « _____ » ноября 2020 г.

Печать организации