

На правах рукописи



ШУТАЕВ Вадим Аркадьевич

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СЕНСОРА ВОДОРОДА
НА ОСНОВЕ ДИОДНОЙ СТРУКТУРЫ Pd/ОКСИД/InP

специальность

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

Гребенщикова Елена Александровна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории инфракрасной оптоэлектроники, ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты:

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

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

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

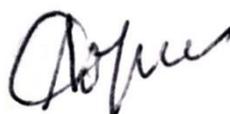
Защита состоится «26» ноября 2020 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 34.01.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте <http://www.ioffe.ru>

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время во всем мире широко обсуждаются возможности использования альтернативных источников энергии. Все большую актуальность приобретает такой источник энергии, как водородное топливо. Энергия, выделяемая при сжигании водорода с кислородом, почти в 3 раза больше, чем при сгорании углеводородного топлива.

Учитывая экологичность, эффективность и доступность водорода развитие водородной энергетики имеет большие перспективы. Однако, принимая во внимание высокую взрывоопасность водорода (при концентрации 4,7–74 об.% в воздухе [1]), необходимо решать вопросы безопасности при его хранении, транспортировке и эксплуатации. Именно поэтому сегодня важное место отводится разработке сенсоров, способных регистрировать утечки водорода.

Большинство промышленно изготавливаемых в настоящее время сенсоров водорода характеризуются быстродействием 2-10 с. К недостаткам производимых сенсоров можно отнести чувствительность к другим газам, необходимость нагрева чувствительного элемента до 200-800°C, низкую точность измерения (3000 ppm), сложность конструкции [2,3]. Альтернативой для вышеупомянутых сенсоров являются сенсоры на основе диодов Шоттки с чувствительным элементом, содержащим палладий [4-7]. Детектирование водорода такими сенсорами осуществляется по изменению электрических характеристик диодов. Согласно исследованиям ряда научных групп, перспективным является фотоэлектрический способ детектирования водорода с применением диодов Шоттки с палладиевым слоем. В отличие от других типов, сенсоры на основе диодов Шоттки не требуют подогрева чувствительного элемента, имеют простую конструкцию, низкое энергопотребление. Несмотря на большое количество исследований, проведенных различными научными группами и направленных на изучение физики процессов, происходящих в структурах с барьером Шоттки при воздействии на них водородом, до сих пор отсутствует четкое понимание явлений, оказывающих влияние на изменение характеристик в исследуемых структурах. Поэтому для улучшения рабочих характеристик этих приборов необходимо детальное изучение электрических и фотоэлектрических характеристик и механизмов токопрохождения в структурах на основе диодов Шоттки с палладиевым слоем.

Целью работы являлась разработка технологии создания структур Pd/InP и Pd/Оксид/InP и развитие модельных представлений о физических процессах, протекающих в структурах при воздействии на них водородом для создания оптоэлектронного сенсора водорода.

Для достижения намеченной цели решались следующие задачи:

1. Разработать технологию создания диодных структур Pd/InP и Pd/Оксид/InP на основе n-InP (100).
2. Исследовать электрические свойства структур при температурах 90-300К в атмосфере воздуха и в атмосфере азотно-водородной смеси с содержанием водорода 0,1-100% и установить зависимость между изменением высоты потенциального барьера в структурах и концентрацией водорода в анализируемой газовой смеси.
3. Исследовать импеданс и вольт-фарадные характеристики структур Pd/InP и Pd/Оксид/InP.
4. Разработать методику измерений фотоэлектрических свойств структур Pd/InP и Pd/Оксид/InP при воздействии на них азотно-водородной смесью с содержанием водорода 0.1-100%.
5. Создать макетный образец оптоэлектронного сенсора водорода.

Объекты и методы исследования.

В качестве исходного материала использовались монокристаллические пластины n-InP (100) $n \approx (2-4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Объектами исследования являлись структуры Pd/InP и Pd/Оксид/InP, где под термином Оксид понимается оксидный слой, выращенный методом анодного окисления в электролите на поверхности полупроводниковой пластины InP и состоящий в основном из оксидов индия и оксидов фосфора, In_2O_3 и P_2O_5 . Экспериментальные образцы изготавливались с использованием методов низкотемпературного плазменного осаждения диэлектрика Si_3N_4 на InP, химического травления и электрохимического анодирования поверхности в растворе электролита, термовакуумного напыления металлов. Рельеф и морфология поверхности оксидных слоев исследовались при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ); структура пленок палладия исследовалась методом рентгенофазового анализа (РФА), АСМ, толщина пленок – методом профилометрии и СЭМ.

Исследовались вольтамперные (ВАХ), вольт-фарадные (ВФХ) и фотоэлектрические характеристики структур Pd/Оксид/InP и диодов Шоттки Pd/InP в диапазоне температур 90-300 К в атмосфере газовой смеси азот-водород различных концентраций.

Обработка данных осуществлялась с помощью программного обеспечения OriginPro 2018.

Научная новизна работы:

1. Впервые проведено исследование влияния водорода на сигнал фототока в структурах Pd/InP и Pd/Оксид/InP и установлено, что скорости изменения фототока в структуре Pd/InP и фотоэдс в структуре Pd/Оксид/InP экспоненциально зависят от концентрации водорода. Данная закономерность может быть использована для количественного определения концентрации водорода в окружающей среде.
2. Исследованы вольт-амперные характеристики структур Pd/InP и Pd/Оксид/InP и показано, что в данных структурах реализуются два механизма проводимости: туннельный и термотуннельный. Повышение концентрации водорода в азотно-водородной смеси приводит к преобладанию туннельного механизма.
3. Показано, что электрофизические характеристики структур Pd/Оксид/InP в воздушной среде и в атмосфере водорода описываются моделью параллельной RC-цепочки с последовательным сопротивлением.
4. Обнаружено, что изменение высоты барьеров в структурах Pd/InP и Pd/Оксид/InP экспоненциально зависит от концентрации водорода в интервале значений (0.1-4%).
5. Впервые исследованы вольт-фарадные характеристики структур Pd/Оксид/InP в воздушной среде и в атмосфере водорода на разных частотах ($f=10^{-1}$ - 10^5 Гц). Обнаружено возникновение гистерезиса в вольт-фарадных характеристиках структур Pd/Оксид/InP в атмосфере водорода, что свидетельствует о наличии связанного заряда в слое оксида или на границе раздела Pd/Оксид.

Практическая значимость работы:

1. 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.%.
2. Оптимальная фоточувствительность сенсора водорода достигается при использовании пленок Pd толщиной 100-450 Å. Показано, что пленки указанной толщины не разрушаются под воздействием водорода.
3. 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.

4. Разработана архитектура структуры Pd/Оксид/InP, в которой на подложке InP последовательно сформированы слои анодного оксида и палладия, ограниченные по периферии подложки диэлектриком Si_3N_4 для снижения поверхностных токов утечки. Лицевой омический контакт к Pd выполнен из золота и имеет крестовидную форму для равномерного растекания тока по поверхности Pd.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. При освещении структур Pd/InP и Pd/Оксид/InP светодиодом с $\lambda=0.9$ мкм со стороны палладиевого слоя и воздействии на них водородом в интервале концентраций 0.1-100 об.% скорость изменения фотоответа и концентрация водорода связаны между собой экспоненциально.

2. В воздушной среде и в атмосфере водорода электрофизические характеристики структур Pd/Оксид/InP описываются моделью параллельной RC-цепочки с последовательным сопротивлением.

3. Изменение высоты барьера в структурах Pd/InP и Pd/Оксид/InP определяется изменением работы выхода палладия в атмосфере водорода. При этом, определение концентрации водорода возможно в диапазоне 0-1 об.%, до выхода экспоненциальной характеристики на насыщение.

4. В атмосфере водорода в оксидном слое структур Pd/Оксид/InP образуется связанный положительный заряд, величина которого соответствует числу атомов водорода, растворенного в структуре.

Личный вклад автора.

Все новые результаты, сформулированные в диссертации, получены лично диссертантом. 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 принимал участие в разработке технологии создания структур Pd/InP и Pd/Оксид/InP, проводил экспериментальные исследования, анализировал их результаты, формулировал выводы.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

1. Международная молодёжная конференция ФизикаА (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).
10. 26th International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, (Minsk, 2018).

Достоверность результатов.

Полученные результаты в разных экспериментах хорошо согласуются с расчетными данными.

Публикации.

По материалам диссертационного исследования опубликовано 7 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, из них - индексируемых Scopus и Web of Science 6 статей и РИНЦ 1 статья, а также 10 тезисов докладов, представленных на российских и международных конференциях; получено 3 патента (2 на полезную модель, 1 на изобретение).

Структура диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 124 страниц. Работа содержит 96 рисунков и 3 таблицы. Список цитируемой литературы составляет 70 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В **первой главе** приведен обзор существующих сенсоров водорода и рассмотрены их основные недостатки. Отмечается, что в большинстве известных методов регистрации водорода используется измерение электрических характеристик при воздействии на структуры водородом, степень изменения которых не обеспечивает необходимую чувствительность. Для повышения чувствительности сенсоров используется подогрев чувствительного элемента, что увеличивает вероятность детонации водорода. Это самый серьезный недостаток в рассмотренных сенсорах. Отдельные виды сенсоров демонстрируют низкую селективность к водороду, сложность конструкции, большое время реакции на появление водорода в окружающей атмосфере и долгое восстановление после прекращения воздействия водородом, малый срок службы, большое энергопотребление при их эксплуатации.

Сенсоры на основе полупроводниковых структур имеют ряд преимуществ по сравнению с другими сенсорами водорода. Преимущество состоит, в первую очередь, в экспоненциальном характере зависимости измеряемой величины (ток, напряжение) от концентрации водорода. Преимущество также заключается в возможности их работы при комнатной температуре и относительной простоте изготовления и использования. Механизм детектирования водорода интерпретируется с точки зрения изменения работы выхода палладия при его контакте с водородом, либо с точки зрения образования дипольного слоя на границе раздела Pd/полупроводник, образованного атомами водорода. Несмотря на многочисленные исследования и применение таких структур, до сих пор нет ясных представлений о механизмах влияния водорода на параметры названных структур.

Анализ литературных данных показал, что одним из самых эффективных является фотоэлектрический способ детектирования водорода с использованием структур на основе диодов Шоттки. Изменение сигнала фотоэдс или фототока составляет 2-3 порядка при воздействии водородом на структуры, при этом не требуется нагрев чувствительного элемента, а повышение чувствительности в оптопаре «источник излучения – чувствительный элемент в качестве фотоприемника» можно осуществить увеличением мощности светодиода.

Во **второй главе** обсуждаются контактирующие материалы диодов Шоттки для создания наиболее эффективного сенсора водорода. Обосновывается выбор материалов, используемых в диссертационной работе.

Приводится методика создания чувствительного элемента на основе диода Шоттки Pd/InP и структуры Pd/Оксид/InP. Рассматриваются особенности создания контакта металл/полупроводник с помощью метода термовакuumного напыления. Обсуждаются возможные причины отклонения экспериментально измеренных параметров структур от теоретических и методы оптимизации этих параметров. Разработана методика создания промежуточного оксидного слоя.

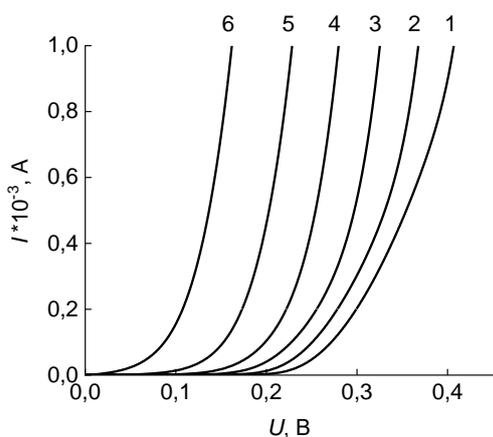


Рис. 1 ВАХ диодов Шоттки Pd/InP; 1 – 90К, 2 – 130К, 3 – 170К, 4 – 210К, 5 – 250К, 6 – 300К

Вольтамперные характеристики (ВАХ) изготовленных диодов измерялись в интервале температур 90-300 К. Исследование характеристик показало, что они имеют диодный характер, с величиной напряжения отсечки не более 0,1 В при комнатной температуре (рис. 1). Обычно высота потенциального барьера в диодах Шоттки отождествляется с напряжением отсечки, определенным по пересечению линейного участка ВАХ при больших прямых смещениях с осью абсцисс.

Анализ энергетических диаграмм контактирующих материалов диода Шоттки Pd/InP показывает, что высота потенциального барьера в них должна быть не менее 0,4 эВ. Однако, при комнатной температуре вольт-амперная характеристика диодов Шоттки Pd/InP имеет величину напряжения отсечки 0,1 эВ. Характеристики диодов Шоттки, создаваемых с применением метода термовакuumного напыления металла, могут отличаться от теоретически рассчитанных характеристик, в отличие, например, от метода нанесения металла посредством холодного осаждения на поверхность полупроводника [6]. Это связано, прежде всего, с высокой энергией образования химической связи на границе раздела металла с полупроводником [8]. В результате может измениться плотность поверхностных состояний и произойти закрепление уровня Ферми в полупроводнике [9,10]. Высота барьера в этом случае не будет зависеть от работы выхода металла и какие-либо измерения с помощью такого диода будут затруднительны. Для устранения эффекта закрепления уровня Ферми в полупроводнике мы использовали промежуточный слой между металлом и

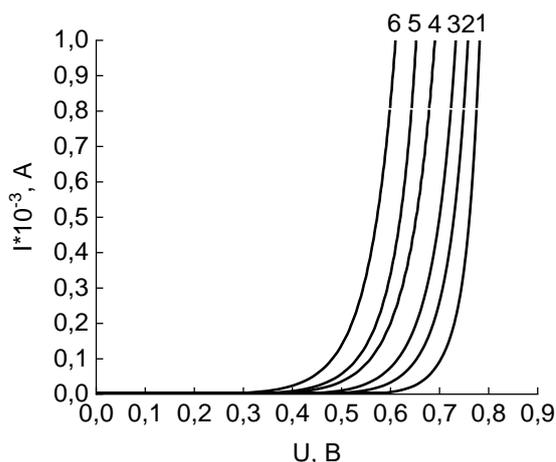


Рис. 2 ВАХ структур Pd/Оксид/InP; 1 – 90К, 2 – 170К, 3 – 210К, 4 – 250К, 5 – 270К, 6 – 300К

Шоттки, рассмотренными в подразделе 2.2.2, напряжение отсечки в структурах Pd/Оксид/InP составляет 0.55 V при комнатной температуре.

Третья глава посвящена комплексным исследованиям структур Pd/Оксид/InP и диодов Шоттки Pd/InP. В разделе 3.2 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 (рис. 3). Показано, что проводимость структур в воздушной среде имеет туннельный характер при низких температурах и термотуннельный при высоких. Температура перехода от туннельного механизма проводимости к термотуннельному приблизительно равна 200 К. Наличие водорода в газовой смеси смещает проводимость структур в сторону преобладания туннельного механизма проводимости.

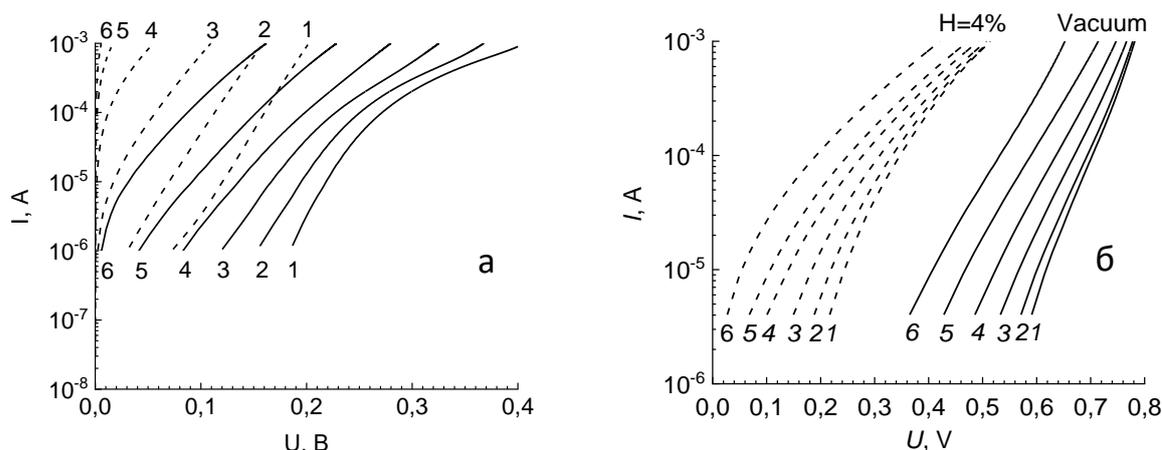


Рис. 3 Прямые ветви ВАХ диодов Шоттки Pd/InP (а) и структур Pd/Оксид/InP (б), измеренные в вакууме (сплошные кривые) и в азотно-водородной смеси с 4 об.% водорода (штриховые кривые) при температурах, К: 1 — 90, 2 — 130, 3 — 170, 4 — 200, 5 — 250, 6 — 300.

полупроводником. Создание промежуточного оксидного слоя на поверхности полупроводника позволило улучшить рабочие характеристики приборов: увеличить напряжение отсечки, повысить температурный режим работы, уменьшить туннельные токи.

В структурах с оксидным слоем ВАХ имеют диодный характер во всем измеренном температурном диапазоне (рис. 2). По сравнению с диодами

В конце раздела приводится сравнительный анализ вольт-амперных характеристик структур Pd/Оксид/InP и диодов Шоттки Pd/InP.

В разделе 3.2 представлены результаты измерений амплитудно-фазовых частотных характеристик структур Pd/Оксид/InP (рис. 4).

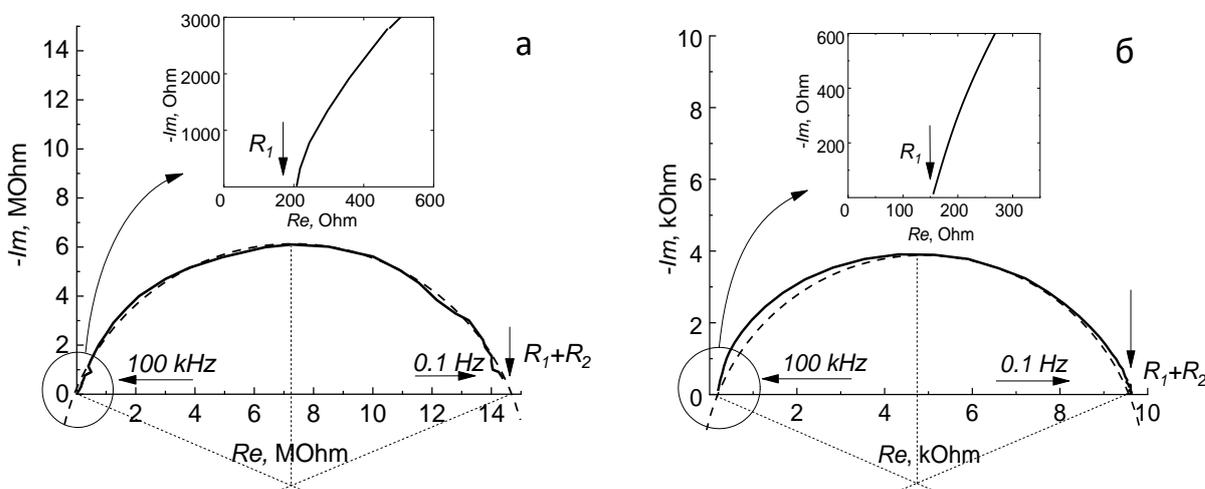


Рис. 4 Амплитудно-фазовые частотные характеристики для структуры Pd/Оксид/InP на воздухе (а) и в азотно-водородной газовой смеси с 4 % водорода (б). Сплошные линии — эксперимент, штриховые — аппроксимация окружностью. На вставках — кривые в увеличенном масштабе в начале координат.

Показано, что характеристики структуры описываются моделью параллельной RC-цепочки с последовательным сопротивлением в воздушной среде и в атмосфере водорода. Сопротивление потенциального барьера в InP в атмосфере водорода меньше на три порядка по сравнению с сопротивлением барьера в воздушной среде, что объясняется изменением высоты потенциального барьера, обусловленного изменением работы выхода палладия при контакте с водородосодержащей смесью.

В разделе 3.3 представлены результаты измерений вольт-фарадных характеристик в воздушной среде и в атмосфере водорода при разных частотах переменного напряжения. Показано, что увеличение емкости структур Pd/Оксид/InP при воздействии на них водородом вызвано уменьшением высоты потенциального барьера и образованием связанного заряда в оксидном слое или на границе раздела Pd/Оксид. Причем, второй процесс является преобладающим. В конце раздела приводится сравнительный анализ вольт-фарадных характеристик структур Pd/Оксид/InP и диодов Шоттки Pd/InP, а также приводится теоретическая оценка изменения емкости при воздействии на структуры водородом.

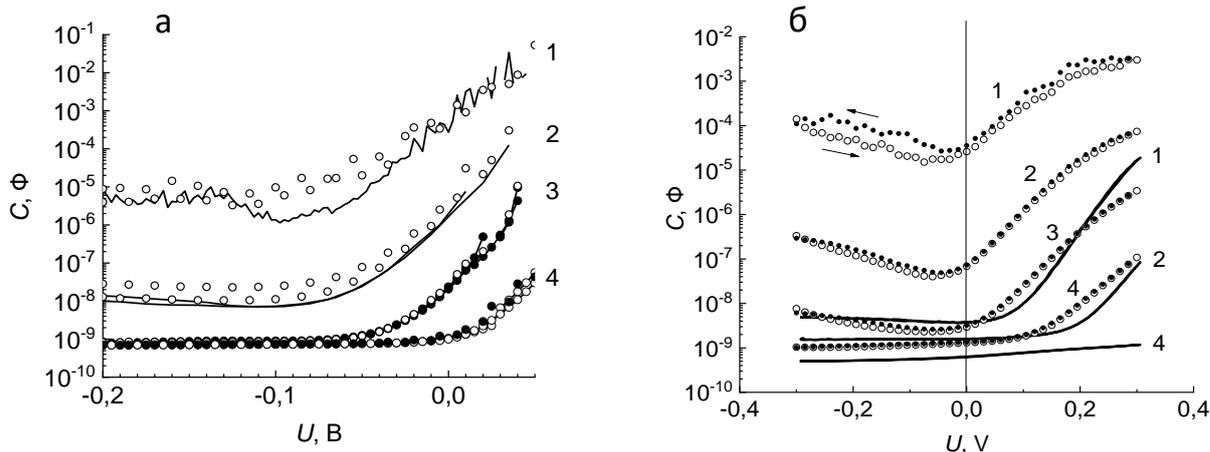


Рис. 5 Вольт-фарадные характеристики диода Шоттки (а) и структуры Pd/Оксид/InP (б) при разных частотах измерения: 1 — 33 Гц, 2 — 1 кГц, 3 — 10 кГц, 4 — 100 кГц; сплошные кривые — на воздухе, другие обозначения — в газовой среде с 4 % водорода.

В разделе 3.4 представлены результаты измерения фототока в диодах Шоттки при контакте структуры с водородом при комнатной температуре. Показано, что при одновременном воздействии на диод Шоттки освещения светодиода ($\lambda=0.9\text{мкм}$) и водорода скорость изменения фототока и концентрация водорода связаны между собой экспоненциально $N_{\text{H}} = a * [\exp(b * S)]$.

Представлены результаты измерения фотоэдс в структурах Pd/Оксид/InP при комнатной температуре (рис. 6). Показано, что при одновременном воздействии на структуры Pd/Оксид/InP освещения и водорода скорость изменения фотоэдс и концентрация водорода связаны между собой экспоненциально $N_{\text{H}} = a * [\exp(b * S)]$.

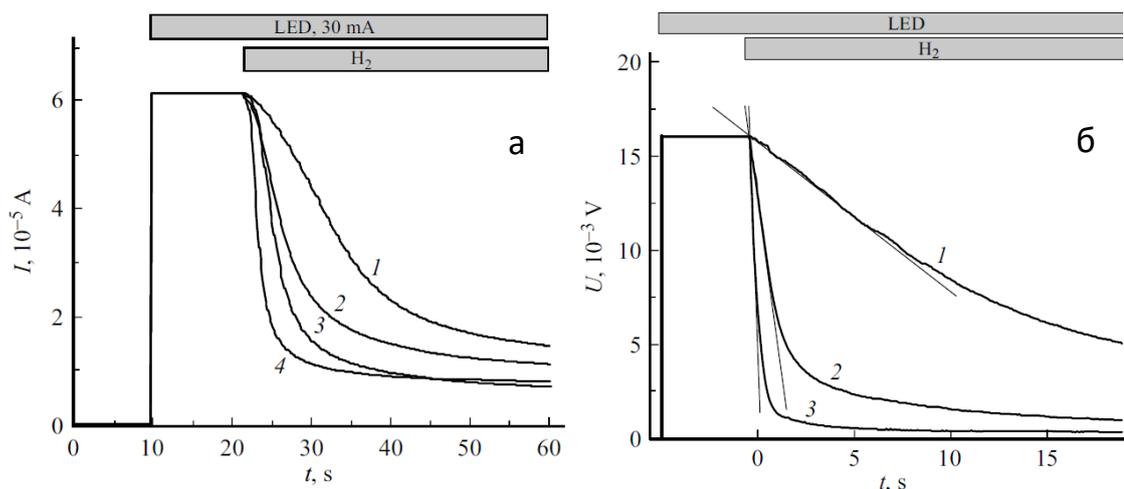


Рис. 6 Фототок диода Шоттки Pd/InP (а) и фотоэдс структуры Pd/Оксид/InP (б) при подаче на структуры газовой смеси с различным содержанием водорода, N_{H} , об%: 1 — 0.1, 2 — 1.0, 3 — 4.0, 4 — 10.0.

Постоянная времени спада фотоэдс, характеризующая быстроту реакции структуры Pd/Оксид/InP при контакте чувствительного элемента с водородом концентрации 4-100 об.%, составляет 0,5 с. Показана возможность детектирования 4% водорода при 270 К по скорости спада фотоэдс.

В конце раздела приводится сравнительный анализ фотоэлектрических характеристик структур Pd/Оксид/InP и диодов Шоттки Pd/InP. Исследованные структуры перспективны для создания на их основе сенсора водорода.

В **заключении** сформулированы основные выводы по полученным результатам диссертационной работы.

1. В структурах обнаружены два механизма проводимости - туннельный и термотуннельный, определены основные параметры, характеризующие эти механизмы. Продемонстрировано влияние водорода на ВАХ структур. Показано, что водород смещает проводимость структур в сторону туннельного механизма.
2. Установлено, что изменение напряжения отсечки $\Delta U_{отс}$ на ВАХ диода Шоттки Pd/InP и структуры Pd/Оксид/InP в диапазоне концентраций водорода 0–1 об. % подчиняется экспоненциальной зависимости. Аналогичная зависимость характеризует изменение работы выхода палладия в водородосодержащей газовой среде. Дополнительный вклад в изменение высоты барьера вносит образование связанного заряда на границе раздела Pd/Оксид или в оксидном слое. По ВАХ структур Pd/InP и Pd/Оксид/InP можно измерить концентрацию водорода в окружающей среде только в пределах до 1 об.%. При больших концентрациях водорода по ВАХ можно зарегистрировать лишь наличие водорода в среде, но не его концентрацию.
3. Показано, что чувствительность фотоэлектрического метода детектирования водорода значительно превосходит чувствительность электрического метода. Скорость изменения фотоответа в диодах Шоттки Pd/InP и структурах Pd/Оксид/InP при одновременном воздействии на них освещением и водородом экспоненциально зависит от концентрации водорода. Показана возможность практического применения установленной зависимости для количественного определения концентрации водорода в газовой среде.
4. Созданные структуры перспективны для их использования в оптоэлектронном сенсоре водорода. На основе оптопары (светодиодный излучатель и фоточувствительная структура Pd/Оксид/InP) был создан макетный образец сенсора, характеризующийся быстродействием (0,5 с), высокой чувствительностью (50 ppm) и низким энергопотреблением (~40 мВт).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1А. А.Н. Именков, Е.А. Гребенщикова, В.А. Шутаев, А.М. Оспенников, В.В. Шерстнёв, Ю.П. Яковлев. Фотоэдс и фототок в структурах Pd-оксид-InP в атмосфере водорода // ФТП. – 2016. – т. 50, вып. 7. – С. 946-951.
- 2А. Гребенщикова Е.А., Именков А.Н., Шутаев В.А., Оспенников А.М., Яковлев Ю.П. Оптоэлектронный датчик водорода на основе структуры Pd/n-InP. // Датчики и системы. – 2017. – № 5. – С. 15-20.
- 3А. 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.
- 4А. 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.
- 5А. 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.
- 6А. 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.
- 7А. 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.
- 8А. Патент на полезную модель №166907 «Устройство для обнаружения водорода», приоритет полезной модели 21 июня 2016, авторов: Гребенщикова Е.А., Именков А.Н., Шутаев В.А., Ильинская Н.Д., Оспенников А.М., Яковлев Ю.П.
- 9А. Патент на изобретение №2621879 «Электролит для анодного окисления полупроводниковых соединений на основе $A^{III}B^V$ », приоритет изобретения 08 августа 2016, авторов: Гребенщикова Е.А., Шутаев В.А., Капралов А.А.
- 10А. 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.

Список литературы

1. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд. Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. / Д.Ю. Гамбург [и др]. — М.: «Химия», 1989. – 276 с.
2. W.M. Tang, C.H. Leung and P.T. Lai. A Study on Hydrogen Reaction Kinetics of Pt/HfO₂/SiC Schottky-Diode Hydrogen Sensors, *Stoichiometry and Materials Science - When Numbers Matter*, Dr. Alessio Innocenti (Ed.) // *InTech*. – 2012. – p. 263-282.
3. V.M. Aroutiounian. Hydrogen detectors – a review / *Альтернативная энергетика и экология*. – 2005. – Vol. 3, № 23. – P. 21-31.
4. B. Podlepetsky, M. Nikiforova, A. Kovalenko. Chip temperature influence on characteristics of MISFET hydrogen sensors / *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2018. – Vol. 254, – P. 1200–1205.
5. P. Sun, Y. Yu, J. Xu, Y. Sun, J. Ma, G. Lu. One-step synthesis and gas sensing characteristics of hierarchical SnO₂ nanorods modified by Pd loading / *Sensors and Actuators B*, 160 (1), 244 (2011).
6. Yen-I Chou, Chia-Ming Chen, Wen-Chau Liu, A New Pd–InP Schottky Hydrogen Sensor Fabricated by Electrophoretic Deposition With Pd Nanoparticles, *Senior Member, IEEE*, and Huey-Ing Chen, *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 26, NO. 2, p. 62 (2005)
7. Lu Chi. "Micro-Fabricated Hydrogen Sensors Operating at Elevated Temperatures". / Lu Chi, University of Kentucky Doctoral Dissertations, 2009. – 767 p.
8. Межфазные взаимодействия и механизмы деградации в структурах металл-InP и металл-GaAs. Под общей редакцией докт.техн. наук, профессора Р.В.Конаковой и докт. физ.-мат. наук, профессора Г.С.Коротченкова / Е.Ф. Венгер и [др.]. – Киев.: Институт физики полупроводников НАН Украины 1999. – 230 с.
9. *Physics and Chemistry of III - V Compound Semiconductor Interfaces* / C. W. Wilmsen [et al.]. – N.Y.-London: Plenum Press, 1985. – 465 p.
10. K. Zdansky. Layers of Metal Nanoparticles on Semiconductors Deposited by Electrophoresis from Solutions with Reverse Micelles / K. Zdansky [et al.] // *Nanoscale Res. Lett.* 2007. – №2. – С. 450–454
11. S. Sankar Naik. Electrical and structural properties of Pd/V/n-type InP (111) Schottky structure as a function of annealing temperature / S. Sankar Naik, [et al.] // *Article in Surface and Interface Analysis*. – №1. – p. 201244.

