

## **АННОТАЦИЯ**

диссертации на соискание степени «доктора философии» (PhD) по специальности «6D071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

**ХАНИЕВ БАҚЫТ АБАЙҰЛЫ**

### **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФОТОНОВ**

Диссертационная работа посвящена изучению электрических характеристик высокочувствительных электронных газовых сенсоров полярных и неполярных газов, являющиеся прибором твердотельной электроники, на основе наноструктурированного пористого кремния (ПК) и гетероструктурных материалов, полученных в результате выращивания на поверхности ПК металлооксидных полупроводников (МОП) методом магнетронного распыления и никелевого металлического слоя, установленный химическим методом. Также представлены результаты исследования их электрических характеристик при наличии воздействия световых фотонов.

#### **Актуальность темы**

В настоящее время развитие промышленных технологий и автоматизации процессов, повышение требований к охране здоровья человека и окружающей среды привели к значительному увеличению спроса на газовые сенсоры. Системы управления и контроля, используемые для анализа состава воздуха в окружающей среде и точного определения концентрации определенного типа газа, в основном состоят из сенсора газа, аналогово-цифрового преобразователя, микропроцессора, используемого для цифровой обработки информации о составе воздуха, и устройств вывода информации. Кроме того, при необходимости такие системы могут быть оснащены системами беспроводной связи для удаленного управления и контроля. К основным областям применения данных устройств можно отнести промышленные предприятия, заводы, шахты, службы промышленной безопасности и места массового скопления людей.

Чувствительный элемент является основным измерительным компонентом электронного газового сенсора. В большинстве случаев в качестве основного чувствительного элемента газовых сенсоров используются МОП, такие как ZnO, SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WO<sub>3</sub> и MoS<sub>2</sub>. Кроме того, опубликовано множество работ по изучению возможностей газовых сенсоров на основе органических соединений, оптических сенсоров, материалов на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и проводящих наноструктур в качестве различных сенсоров газа. Однако наиболее распространенные на практике газовые сенсоры на основе МОП в большинстве случаев работают при высоких температурах от 150 до 300°C, что, соответственно, требует большего энергопотребления и имеет более низкую селективность и чувствительность к некоторым типам газа. Кроме того, они

имеют плохую совместимость с современными электронными устройствами на основе кремния и сложную технологию изготовления. Таким образом, мониторинг вредных газов с помощью газовых сенсоров на основе МОП при комнатной температуре можно считать сложной задачей.

Большая площадь поверхности, обусловленная фрактальной структурой материала, химическая активность поверхности материала, несложность технологии извлечения, а также наличие уникальных оптических, электрических и структурных свойств делают материал ПК перспективным материалом для использования в качестве чувствительного элемента в технологии газовых сенсоров. Кроме того, еще одним преимуществом использования кремниевых наноструктур в качестве сенсоров газа является их совместимость с современной электроникой. Хотя ПК весьма чувствителен к некоторым видам газов, его стабильность невысока из-за достаточно быстрого окисления его поверхности. Следовательно, для промышленных применений твердотельной электроники можно повысить чувствительность и селективность электронных газовых сенсоров к трудно обнаруживаемым типам газов, используя гетероструктурный материал, состоящий из ПК и МОП. Результаты экспериментального исследования показали, что полученные образцы могут обнаруживать вредные газы при комнатной температуре до концентрации 0.1 ppm. Эти результаты указывают на возможность создания высокочувствительных и экономичных электронных сенсоров различных вредных и опасных газов. Для получения чувствительных элементов и изучения их электрических, морфологических и оптических характеристик использовались высокотехнологичные оборудования и процессы электроники.

Таким образом, изучение электрических, оптических и морфологических свойств наноразмерных полупроводниковых материалов, а также повышение чувствительности, селективности электронных газовых сенсоров на основе изученных материалов к полярным и неполярным газам является актуальной задачей, имеющая важное практическое значение в электронике.

### **Цель работы**

Исследование электрических, оптических, морфологических характеристик наноструктурированного пористого кремния и пористого кремния, на поверхности которого установлены металло-оксидный полупроводник и металлический слой, также разработка на их основе высокочувствительный и селективный электронный газовый сенсор для полярных и неполярных типов газов.

### **Объекты исследования**

Наноразмерные пористый кремний, CuO/ПК, WO<sub>3</sub>/ПК, Ni/ПК.

### **Предмет исследования**

Изменение электропроводности пористого кремния, наноразмерных полупроводниковых гетероструктур под действием света, влияние металлооксидных полупроводников и металлических частиц на газочувствительные свойства пористого кремния.

## **Методы исследования**

Метод электрохимического травления для получения пористого кремния, метод магнетронного распыления для установки металл-оксидных полупроводников на поверхности пористого кремния, химический метод установки металлического слоя, экспериментальные и аналитические методы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. С помощью электронных устройств и высокотехнологичных процессов получение образцов ПК методом электрохимического травления, установка МОП на поверхность ПК методом магнетронного распыления, а также нанесение слоя никеля на поверхность ПК химическим методом;

2. Исследование морфологических, оптических, электрических свойств образцов и изучение влияния фотонов света на электрические свойства образцов;

3. Исследование чувствительных характеристик полупроводниковых наноструктур к парам аммиака, этанола, толуола, хлороформа и создание электронного сенсора газа на основе полученных чувствительных материалов;

## **Новизна работы**

Новизна и оригинальность диссертационной работы заключаются в том, что в ней **впервые**:

1. Обнаружено, что существуют оптимальные эффективные параметры электрохимического травления пористого кремния, при которых чувствительность электронного газового сенсора на его основе наиболее высока.

2. Экспериментально продемонстрировано, что чувствительность и селективность газовых сенсоров к полярным и неполярным газам повышается при покрытии поверхности пористого кремния металлическим слоем и установки металло-оксидных полупроводников.

3. Проведен количественный анализ нелинейной гистерезисной структуры в вольт-амперных характеристиках (ВАХ) полупроводниковых материалов ПК, CuO/ПК, WO<sub>3</sub>/ПК в комнатных условиях и при воздействии фотонов света.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Наноструктурный ПК p-типа, полученный методом электрохимического травления при параметрах  $j = 5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $U = 30 \text{ В}$ ,  $t = 40 \text{ мин}$  (пористость 72 %) является самым эффективным газовым сенсором NH<sub>3</sub> при концентрации 0.1 ppm в диапазоне пористости 59 – 83%.

2. Чувствительность газового сенсора на основе гетероструктуры CuO/ПК к парам толуола и хлороформа до 0.1 ppm концентрации при значении напряжения  $U = 2 \text{ В}$  достигает от <1 % до 33.9 % и 27.6 %, соответственно, по сравнению с исходным ПК.

3. Площади нелинейного гистерезиса в ВАХ пористого кремния и гетероструктур CuO/ПК, WO<sub>3</sub>/ПК, измеренные в диапазоне напряжений 0 – 2 В при воздействии фотонов света ксеноновой лампы интенсивностью 0.1 Вт/см<sup>2</sup> увеличиваются в 10.6, 2.1 и 3.7 раза, соответственно, по сравнению с комнатными условиями.

### **Теоретическая и практическая значимость исследования.**

Результаты диссертации позволяют изготовить недорогие малогабаритные газовые сенсоры с высокой чувствительностью и селективностью к парам аммиака, этанола, толуола, хлороформа на основе полупроводниковых наноструктур.

### **Достоверность и обоснованность полученных результатов**

Достоверность результатов, достигнутых в диссертационной работе, подтверждается наличием публикаций в изданиях, рекомендованных КОКСМНВО РК, в зарубежных журналах, входящих в базу данных Web of Science (Clarivate Analytics, США) и Scopus (Elsevier, Нидерланды), и в трудах международных конференций, также согласованностью с результатами других авторов.

### **Личный вклад автора**

Автор участвовал в исследовательской работе на всех этапах диссертационной работы. Работы по получению полупроводниковых наноструктур, изучению влияния частиц газа и света на их электрические характеристики, а также обработке и анализу результатов исследования оптических, морфологических и электрических характеристик образцов проводились автором. Утверждение задач и плана работы, обсуждение результатов выполнены совместно с научным руководителем.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, из них 3 работы в научных изданиях, рекомендуемых КОКСМНВО РК, 5 публикации в сборниках тезисов докладов международных конференций, 2 журналах, входящих в международные информационные ресурсы Web of Science (Clarivate Analytics, США) и Scopus (Elsevier, Нидерланды).

### **Апробация диссертационной работы**

Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались:

- на Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Фараби Әлемі» (2019, 2021, 2022, Алматы, Казахстан);
- на 11-й Международной научной конференции «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (2019, Караганда, Казахстан);

### **Авторское свидетельство:**

Ханиев Б.А., Ибраимов М.К., Жанабаев З.Ж., Сагидолда Е., Диханбаев К.К., Тілеу А.О. Высококочувствительный аммиачный сенсор на основе пористого кремния // Авторское свидетельство, 2022. №24953.

### **Объем и структура диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка использованных источников из 121 наименований, содержит 103 страниц основного компьютерного текста, включая 82 рисунков, 52 формул и 7 таблиц.