

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Соловьёва Ярослава Александровича

**«Формирование методом быстрой термообработки барьерных слоев для кремниевых диодов Шоттки с улучшенной энергоэффективностью»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

### **1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите**

Содержание диссертации соответствует технической отрасли наук и паспорту специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах, утвержденному приказом ВАК Республики Беларусь от 01.03.2023 г. № 45, в следующих пунктах раздела III (область исследований):

п. III.2. Физические и технические аспекты модификации изделий и приборов;

п. III.4. Физические и математические модели изделий, устройств и технологических процессов, в том числе для систем автоматизированного проектирования;

п. III.5. Функциональные и эксплуатационные характеристики изделий и устройств, включая качество, долговечность, надежность и стойкость к внешним воздействиям, а также эффективность их применения в технике.

### **2. Актуальность темы диссертации**

В диссертации представлены разработки технологических процессов формирования силицидных слоев для барьеров диодов Шоттки с заданными свойствами путем быстрых термических обработок одно- и двухслойных металлических пленок на кремнии. Установлены закономерности влияния данных обработок на изменения структурно-фазовых и барьерных свойств в таких системах. Данное исследование является актуальным для создания электронной компонентной базы систем преобразования и управления электропитанием в контексте решения важнейшей задачи энергосбережения.

### **3. Степень новизны результатов диссертации и научных положений, выносимых на защиту**

Все результаты и научные положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной. К их числу следует отнести следующие.

1. Предложена физико-математическая модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с нерабочей стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности, основанная на уравнении нестационарной теплопроводности, учитывающая преобразование потребляемой источником излучения мощности в плотность потока

излучения, влияние температуры подложки на ее теплоемкость, плотность и степень черноты покрытия рабочей стороны, прогнозирующая изменение температуры пластины от мощности источника излучения и времени от начальной температуры до 960 °С с отклонением менее 2,5 %.

2. Установлены закономерности изменений структурно-фазовых свойств и высоты барьера Шоттки в системе Cr/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~7 с) некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N<sub>2</sub>, заключающиеся в формировании при температуре более 400 °С слоя CrSi<sub>2</sub> с размерами кристаллических зерен от 200 до 500 нм и волнообразной морфологией поверхности, обусловленной генерацией вакансий за счет эффекта Киркендала и их последующей деформационно-стимулированной диффузией, а в диапазоне температур от 450 до 500 °С – в формировании сглаженного микрорельефа границы CrSi<sub>2</sub>/Si, характеризующейся высотой барьера Шоттки ~0,61 В.

3. Выявлены закономерности изменений структурно-фазовых свойств и высоты барьера Шоттки в системе Ni/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~7 с) некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N<sub>2</sub>, заключающиеся в образовании фазы Ni<sub>2</sub>Si при температуре 200 °С, силицидного слоя, содержащего фазы Ni, Ni<sub>2</sub>Si и NiSi, при температуре 300 °С и структурно-однородного слоя орторомбической фазы NiSi в диапазоне температур от 350 до 550 °С, который в интервале температур обработки от 400 до 450 °С характеризуется размерами кристаллитов от 100 до 200 нм, сглаженной границей раздела с кремнием и высотой барьера ~0,63 В.

4. Обнаружены закономерности изменений структурно-фазовых свойств и высоты барьера Шоттки в системе Ni–Pt–V/Si, происходящие после ее быстрой термической обработки (~7 с) при температуре от 450 до 500 °С некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N<sub>2</sub>, заключающиеся в образовании орторомбической фазы NiSi с трансротационной степенью упорядоченности на эпитаксиальных к подложке доменах β-Ni<sub>31</sub>Si<sub>12</sub>, содержащих атомы Pt, инкорпорированные в зародыши растущей фазы силицида на ранних стадиях формирования с сегрегацией силицида платины на межзеренных границах, включая границу раздела с кремнием, приводящие к формированию контакта с высотой барьера ~0,71 В.

5. Установлены закономерности изменений структурно-фазовых свойств и высоты барьера Шоттки в системе Ni–V/Pt/Si при ее быстрой термообработке (~7 с) в интервале температур от 400 до 600 °С в атмосфере N<sub>2</sub>, приводящей за счет диффузии Si при температуре 400 °С, Ni при температуре 450 °С и Pt при температуре выше 500 °С в результате последовательности фазовых переходов PtSi → NiSi → Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si соответственно к формированию на границе раздела с кремнием структурно однородного слоя со сглаженной морфологией и уменьшенной дефектностью границы раздела Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si/Si, в которой при температуре 550 °С увеличение толщины



пленки Ni-V от 20 до 40 нм обуславливает уменьшение высоты барьера Шоттки от 0,83 до 0,80 В.

Полученные в диссертации новые научные результаты и положения, выносимые на защиту, представляют собой логически связанную и обоснованную методологию формирования быстрой термической обработкой барьерных слоев для диодов Шоттки с требуемыми контактными свойствами. Новизна конструктивных и технологических решений подтверждена полученными патентами на изобретения.

#### **4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Выводы и рекомендации, представленные в диссертации, обоснованы использованием известного математического аппарата численного решения задачи нестационарной теплопроводности, а также применением современных методов и техники исследований структурно-фазовых, электрофизических и контактно-барьерных свойств: растровая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия плоских и поперечных сечений, просвечивающая электронная дифракция, обратное резерфордовское рассеяние, рентгеновский фазовый анализ, атомно-силовая микроскопия, четырехзондовый метод, измерения вольт-амперных характеристик.

Результаты диссертации используются в системах управления нагревом пластин в оборудовании быстрой термической обработки и технологических процессах формирования контактных структур изделий электронной техники.

#### **5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию**

Научная значимость результатов диссертации заключается в получении новых знаний о закономерностях технологий формирования протяженных и бездефектных барьерных слоев для диодов Шоттки с максимальной температурой эксплуатации от +100 до +175 °С. Предложена физико-математическая модель процесса нагрева кремниевых подложек импульсом некогерентного излучения постоянной мощности, основанная на уравнении нестационарной теплопроводности и учитывающая преобразование потребляемой источником излучения электрической мощности в плотность мощности потока излучения, температурные изменения плотности, теплоемкости и степени черноты материала покрытия рабочей стороны подложки, прогнозирующая изменение температуры подложки от мощности источника излучения и времени при нагреве от начальной температуры с отклонением менее 2,5 %. Установлены закономерности изменений структурно-фазовых свойств и высоты барьеров Шоттки, происходящих в результате быстрой термической обработки (~7 с) в азотной среде структур Cr/Si, Ni/Si, Ni-Pt-V/Si, Ni-V/Pt/Si.

**Практическая значимость** заключается в том, что с использованием разработанной физико-математической модели нагрева высоколегированных кремниевых пластин построена система управления нагревом в установках быстрой термообработки. Разработанная технология формирования барьерного слоя диода Шоттки быстрой термообработкой системы Cr/Si позволяет в 1,4 раза уменьшить плотность прямого тока по сравнению с системой Mo/Si-барьера. Предложенная технология формирования барьерного слоя диода Шоттки быстрой термообработкой системы Ni/Si позволяет до 1,15 раза уменьшить величину прямого напряжения по сравнению молибденовым барьером. Технология создания барьерного слоя диода Шоттки быстрой термообработкой системы Ni-Pt-V/Si позволяет получать барьерные слои для диодов Шоттки с расширенным температурным диапазоном эксплуатации. Разработанная технология формирования барьерных слоев диодов Шоттки быстрой термообработкой системы Ni-V/Pt/Si позволяет до 1,18 раза уменьшить прямое напряжения по сравнению с PtSi/Si барьером, полученным стационарной термообработкой.

**Экономическая значимость** состоит во внедрении результатов работы в производство изделий электронной техники ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» и системы управления нагревом установок быстрой термообработки пластин производства ООО «Перспективные инновационные технологии». Стоимость продукции, выпущенной с использованием результатов диссертации в течение года составляет более 3,35 млн. белорусских рублей, что подтверждается актами использования результатов диссертации.

**Социальная значимость** результатов диссертации состоит в повышении конкурентоспособности продукции и экспортного потенциала белорусских предприятий электронной промышленности, сохранении и увеличении количества рабочих мест на предприятиях электронной промышленности.

#### **6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати**

По результатам представленных в диссертации исследований опубликованы 64 научные работы, из них 1 монография, 17 статей объемом 7,4 авторского листа, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий ВАК, 8 статей в других научных изданиях, 21 статья в материалах научных конференций, 17 тезисов докладов на научных конференциях.

Новизна конструктивных и технологических решений подтверждена полученными 5 евразийскими патентами и 13 патентами Республики Беларусь на изобретения.

Все положения диссертации, выносимые на защиту, а также разделы диссертации и автореферата отражены в опубликованных материалах.

## **7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК**

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям Инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации.

Автореферат отражает содержание диссертационной работы, выводы и положения, которые выносятся на защиту.

## **8. Замечания по диссертации**

1. В диссертации не приводятся конкретные значения мощностей источника излучения для быстрой термической обработки, обеспечивающие нагрев кремниевых пластин до фиксированных значений температур.

2. Не приводятся точности задания (определения) температур при быстрой термической обработке (глава 4).

3. Из текста диссертации не ясно, каким образом определялось, что время нагрева до фазового перехода не превышало 40 с? (с. 63).

4. В главе 2 «Методы подготовки и исследований структур» следовало бы привести данные об использованном для измерений температур фазовых переходов пирометре «Термоскоп-600-1» (с. 63).

5. С какой точностью определялась плотность мощности потока излучения, ее конкретная величина, термин «отклонение» не совсем корректен, так как неизвестно к чему он относится: к диапазону или конкретной величине (с. 70).

6. В диссертации встречаются неудачные выражения «...обратная сторона...» без указания к чему, более точно на с. 66 «...нерабочая и рабочая стороны кремниевой пластины», «...наилучшей воспроизводимостью электрофизических свойств...» (с. 88); опечатки в названиях главы 4 «...CR/SI» (с. 71), главы 5 «...NI/SI» (с. 86) – правильное обозначение химических элементов Cr/Si и Ni/Si, с. 73 – рисунок 4.2 без подписи.

Замечания не затрагивают защищаемых положений и выводов, представленных в диссертации, и не снижают научной, практической, экономической и социальной значимостей полученных результатов.

## **9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует**

По совокупности представленных и научно обоснованных результатов, подтвержденных научными публикациями в журналах высокого научного уровня и материалами докладов по теме диссертации на научных конференциях, использованных методов исследований и интерпретации полученных результатов можно сделать вывод о том, что соискатель Соловьёв Я.А. соответствует научной квалификации доктора технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.



## 10. Заключение

Диссертация Соловьёва Ярослава Александровича является законченной квалификационной научной работой, подготовленной соискателем самостоятельно (научный консультант – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета Гайдук П.И.), содержащей новые научно-обоснованные результаты, совокупность которых является существенным вкладом в развитие технологий создания и модификации твердотельных изделий микро- и нанoeлектроники, и соответствует требованиям пункта 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий. Содержание диссертационной работы полностью соответствует отрасли технических наук по профилю специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Считаю, что Соловьёв Ярослав Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах за концептуальное развитие актуального научного направления «энергoэффективные технологии для создания фотонных микроэлектронных структур» и полученные принципиально новые результаты, совокупность которых является крупным достижением в данной области, включающие:

- разработку физико-математической модели нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности, основанной на уравнении нестационарной теплопроводности, учитывающей преобразование потребляемой источником излучения мощности в плотность потока излучения, влияние температуры подложки на ее теплоемкость, плотность и степень черноты покрытия рабочей стороны, прогнозирующей изменение температуры пластины от мощности источника излучения и времени от начальной температуры до 960 °С с отклонением менее 2,5 %;

- установленные закономерности изменений структурно-фазовых свойств и высоты барьера Шоттки в системе Cr/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~7 с) некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N<sub>2</sub>, заключающиеся в формировании при температуре более 400 °С слоя CrSi<sub>2</sub> с размерами кристаллических зерен от 200 до 500 нм и волнообразной морфологией поверхности, обусловленной генерацией вакансий за счет эффекта Киркендала и их последующей деформационно-стимулированной диффузией, а в диапазоне температур от 450 до 500 °С – в формировании сглаженного микрорельефа границы CrSi<sub>2</sub>/Si, характеризующейся высотой барьера Шоттки ~0,61 В, что позволяет создавать барьерные слои с увеличенной в 1,4 раза плотностью прямого тока по сравнению с барьером Mo/Si;

– выявленный механизм формирования барьерных слоев для диодов Шоттки с уменьшением до 1,15 раза прямого напряжения по сравнению с молибденовым барьером посредством быстрой термообработки системы Ni/Si импульсом некогерентного излучения постоянной мощности, вызывающей при нагреве до температуры от 400 до 450 °С за ~7 с в среде N<sub>2</sub> образование в результате фазовых переходов Ni→Ni<sub>2</sub>Si→NiSi структурно-однородного слоя и сглаженной границы раздела NiSi/Si с уменьшенной плотностью дефектов и высотой барьера Шоттки ~0,63 В;

– закономерности изменений структурно-фазовых свойств и высоты барьера Шоттки в Ni-Pt-V/Si при облучении импульсом некогерентного излучения постоянной мощности, заключающиеся в том, что ее нагрев в температурном диапазоне от 450 до 500 °С за ~7 с в среде N<sub>2</sub>, позволяющие получать барьерные слои для диодов Шоттки с расширенным температурным диапазоном эксплуатации за счет формирования в результате последовательности фазовых переходов Ni→Ni<sub>2</sub>Si→NiSi слоев NiSi, содержащих атомы Pt, инкорпорированные в зародыши растущей фазы силицида на ранних стадиях формирования с сегрегацией PtSi на межзеренных границах, включая границу раздела с кремнием, что обуславливает формирование контактов с высотой барьера Шоттки ~0,71 В;

– установленные закономерности влияния нагрева системы Ni-V/Pt/Si с толщиной слоя Ni-V от 20 до 40 нм и слоя Pt ~40 нм импульсом некогерентного излучения постоянной мощности до температуры 550 °С за ~7 с в среде N<sub>2</sub>, заключающиеся в формировании барьерных слоев для диодов Шоттки расширенного температурного диапазона эксплуатации с уменьшением до 1,18 раза прямого напряжения по сравнению с PtSi/Si барьером, полученным стационарной термообработкой, что обусловлено синтезом в результате последовательности фазовых переходов PtSi→NiSi→Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si структурно-однородного слоя со сглаженной морфологией и уменьшенной дефектностью границы раздела Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si/Si, в которой увеличение толщины пленки Ni-V от 20 до 40 нм приводит к уменьшению высоты барьера Шоттки от 0,83 до 0,80 В.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий лабораторией  
микро- и наносенсорики  
Государственного  
научно-производственного  
объединения «Оптика, оптоэлектроника  
и лазерная техника»

*Н.И. Мухуров*

Н.И. Мухуров



*Организовано: С.В. Трохименко*  
*28.10.2024.*

