

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
Государственного научно-
производственного объединения
«Научно-практический центр
НАН Беларуси по материаловедению»,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент НАН Беларуси

В. М. Федосюк

«27» ноября 2024 г.

ОТЗЫВ

оппонирующей организации на диссертацию

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 наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Экспертиза диссертации и автореферата Соловьёва Я.А. проводилась в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 17.11.2004 № 560 (в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 02.06.2022 № 190), и Положения о совете по защите диссертаций, утвержденного постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 22.02.2005 № 19 (в ред. Постановления ВАК от 19.08.2022 №2)

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Анализ содержания диссертации позволяет констатировать ее соответствие специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах согласно паспорту данной специальности (Приказ Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 1 марта 2023 г. № 45) в части следующих областей исследований:

п. 3.2 – физические и технические аспекты модификации изделий и приборов;

п. 3.3 – физические и математические модели изделий, устройств и технологических процессов, в том числе для систем автоматизированного проектирования;

п. 3.4 – функциональные и эксплуатационные характеристики изделий и устройств, включая качество, долговечность, надежность и стойкость к внешним воздействиям, а также эффективность их применения в технике.

Поскольку выполненные исследования связаны с техническими аспектами создания, функционирования и модификации твердотельных изделий микро- и нанoeлектроники, а также с применением их в науке и технике, то представленная диссертация соответствует технической отрасли наук.

Научный вклад соискателя в разработку научной проблемы с оценкой его значимости

В диссертации обобщены результаты работ, выполненных непосредственно Соловьёвым Я.А. и направленных на разработку новых технологических процессов формирования быстрой термообработкой барьерных слоев с заданными свойствами для создания кремниевых диодов Шоттки с улучшенной энергоэффективностью.

Научный вклад соискателя заключается в определении направления и постановке задач исследований, выборе условий проведения экспериментальных работ, методов изучения свойств получаемых контактных систем, интерпретации и анализе полученных результатов. Под руководством Соловьёва Я.А. и при его непосредственном участии выполнены основные экспериментальные исследования, разработана физико-математическая модель нагрева кремниевых пластин, установлены оптимальные технологические режимы формирования барьерных слоев для диодов Шоттки.

Высокая значимость научного вклада соискателя подтверждается 82 печатными работами в том числе 1 монографией, 17 статьями, соответствующими пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении научных званий, 8 статьями в других научных изданиях, 21 статьей в материалах научных конференций, 17 тезисами докладов на научных конференциях, 18 патентами на изобретения.

Конкретные научные результаты, за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Диссертация Соловьёва Я.А. представляет собой законченное, логически обоснованное и выполненное на высоком научном уровне исследование с применением современных экспериментальных методов.

Анализ содержания диссертации позволяет сделать вывод о том, что соискателю Соловьёву Я.А. может быть присуждена ученая степень 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 «фотонные технологии для создания микроэлектронных структур» и получение принципиально новых результатов, совокупность которых является крупным достижением в области микроэлектроники, включающих:

1. Разработанную физико-математическую модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности мощности, основанная на уравнении нестационарной теплопроводности, которая при электрической мощности источника излучения от 700 до 2700 Вт и коэффициенте ее преобразования в плотность мощности потока излучения $5,16 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}$ прогнозирует изменение температуры кремниевой пластины от начальной до 960°C с отклонением менее 2,5 %, что позволяет управлять температурно-временными параметрами полупроводниковых структур процессов быстрой термообработки;

2. Установленные закономерности структурно-фазовых изменений в системе Cr/Si при быстрой термообработке за ~ 7 с некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N_2 , заключающиеся в образовании при температуре от 400 до 450°C слоя CrSi_2 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 550°C – в формировании сглаженного микрорельефа границы CrSi_2/Si , характеризующейся высотой барьера Шоттки $\sim 0,61$ В, что позволяет создавать барьерные слои с увеличенной в 1,4 раза плотностью прямого тока по сравнению с барьером Mo/Si .

3. 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°C за ~ 7 с в среде N_2 образование в результате фазовых переходов $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}_2\text{Si} \rightarrow \text{NiSi}$ структурно-однородного слоя и сглаженной границы раздела NiSi/Si с уменьшенной плотностью дефектов и высотой барьера Шоттки $\sim 0,63$ В.

4. Зарегистрированные закономерности изменений контактно-барьерных свойств системы Ni-Pt-V/Si при облучении импульсом некогерентного излучения постоянной мощности, заключающиеся в том, что ее нагрев в температурном диапазоне от 450 до 500°C за ~ 7 с в среде N_2 позволяет получать барьерные слои для диодов Шоттки с расширенным температурным диапазоном эксплуатации за счет формирования в результате последовательности фазовых переходов $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}_2\text{Si} \rightarrow \text{NiSi}$ 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 $\sim 0,71$ В.

5. 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°C за ~ 7 с в среде N_2 , 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 $PtSi \rightarrow NiSi \rightarrow Ni_xPt_ySi$ структурно однородного слоя со сглаженной морфологией и уменьшенной дефектностью границы раздела Ni_xPt_ySi/Si , в которой увеличение толщины пленки Ni-V от 20 до 40 нм приводит к уменьшению высоты барьера Шоттки с 0,83 до 0,80 В.

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

Представленные в диссертационной работе результаты могут быть рекомендованы к использованию на предприятиях электронной промышленности при создании контактных структур изделий электронной техники.

Разработанные технологические процессы получения контактно-барьерных слоев, сформированных быстрой термообработкой, для создания диодов Шоттки и формирования омических контактов с использованием роботизированной установки поштучной быстрой термообработки полупроводниковых пластин «УБТО ПИТ 1801» внедрены в серийное производство полупроводниковых приборов и интегральных схем в филиале «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» –управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Предложенная физико-математическая модель температуры нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности, использована в методике градуировки установок быстрой термической обработки моделей «УБТО ПИТ 1801» и «УБТО ПИТ 1802», изготовленных ООО «Перспективные инновационные технологии», что позволило создать в указанных установках системы управления нагревом подложек с заданными температурно-временными параметрами.

Замечания по диссертации

1. В главе 2 при описании методик электрофизических измерений не указаны погрешности измерений вольт–амперных характеристик.

2. В тексте диссертации не указана природа дефектов на границах раздела силицид – кремний для исследованных систем, а также не дана оценка их плотности.

3. При исследованиях структурно-фазовых свойств и элементного состава не приведено экспериментальное подтверждение сегрегация платины на границе с кремнием после быстрой термообработки системы Ni–Pt–V/Si.

4. Расчет коэффициента преобразования электрической мощности ламп нагрева в плотность мощности потока излучения проводился без учета спектральной зависимости коэффициента отражения излучения от поверхности пластины.

5. В тексте диссертации и автореферата в качестве единицы измерения температуры используется градус Цельсия ($^{\circ}C$) вместо Кельвина (K).

Тем не менее, приведенные замечания не затрагивают основных положений и выводов, содержащихся в диссертации, и не снижают ее научной, практической, экономической и социальной значимости.

Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Совокупность представленных новых достоверных и научно обоснованных результатов, подтвержденных научными публикациями в рецензируемых журналах, и докладами по теме диссертации на научных конференциях, аргументированных выводов, используемых методов исследований и интерпретации полученных результатов, качественного оформления диссертации и автореферата в соответствии с требованиями ВАК Беларуси позволяет сделать вывод о том, что научная квалификация соискателя Соловьёва Ярослава Александровича соответствует ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Диссертация Соловьёва Я.А. «Формирование методом быстрой термообработки барьерных слоев для кремниевых диодов Шоттки с улучшенной энергоэффективностью» является самостоятельно выполненной и законченной научной работой, и соответствует всем требованиям ВАК Беларуси, предъявляемым диссертациям на соискание ученой степени доктора наук.

Отзыв оппонировавшей организации, подготовленный экспертом, доктором технических наук Богатыревым Юрием Владимировичем, назначенным приказом от 30.10.2024 № 32, рассмотрен и утвержден на расширенном научном семинаре ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (протокол от 27 ноября 2024 г. № 7), на котором соискатель Соловьёв Я.А. выступил с докладом. На заседании присутствовали:

Всего 27 человек, из них – 5 докторов наук и 13 кандидатов наук. Результаты открытого голосования присутствовавших на заседании, которые имеют ученые степени:

«за» – 18, «против» – нет, «воздержавшихся» – нет.

Председатель научного семинара,
заведующий лабораторией,
кандидат физико-математических наук

 Г.С. Римский

Эксперт,
главный научный сотрудник,
доктор технических наук

 Ю.В. Богатырев

Секретарь научного семинара,
ведущий научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

 Ю.В. Радюш