

ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертации **Соловьёва Ярослава Александровича**
на тему «Формирование методом быстрой термообработки
барьерных слоев для кремниевых диодов Шоттки
с улучшенной энергоэффективностью»,

представленной 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 специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах (п. 3.2, 3.4, 3.5 паспорта специальности). Проведенные в работе исследования связаны с техническими аспектами создания, функционирования и модификации твердотельных изделий микро- и нанoeлектроники, а также с применением их в науке и технике что подтверждает соответствие диссертации технической отрасли науки.

2. Актуальность темы диссертации

Актуальность диссертационной работы **Соловьёва Я.А.** определяется следующими факторами:

– фундаментальными преимуществами диодов Шоттки по сравнению с р-п-диодами, заключающимися в меньшем падении напряжения при прямом смещении и лучшем быстродействии, вызванным отсутствием неосновных носителей;

– отсутствием в Республике Беларусь серийной технология формирования быстрой термообработкой протяженных силицидных слоев для диодов Шоттки, предназначенных для эксплуатации в различных температурных диапазонах;

– снижением времени разработки таких диодов Шоттки за счет использования оптимальных конструкций и технологий их изготовления.

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

Анализ полученных в диссертации основных результатов в сравнении с литературными данными показывает, что приведенные теоретические и экспериментальные результаты, равно как выводы и выносимые на защиту положения диссертации, являются новыми.

Наиболее важными и новыми результатами диссертационной работы представляются следующие:

1. На основании уравнении нестационарной теплопроводности предложена физико-математическая модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности, прогнозирующая изменение температуры

пластины от мощности источника излучения и времени при нагреве от начальной температуры до 960°C с отклонением менее 2,5 %.

2. Установлены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Cr/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~ 7 с) некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N_2 , заключающиеся в формировании при температуре более 400°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 500°C – в стабилизации удельного сопротивления слоя CrSi_2 в диапазоне от 2 до 4 мОм·см и формировании сглаженного микрорельефа границы CrSi_2/Si , характеризующейся высотой барьера Шоттки $\sim 0,61$ В.

3. Выявлены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Ni/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~ 7 с) некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N_2 , заключающиеся в образовании фазы Ni_2Si при температуре 200°C , силицидного слоя, содержащего фазы Ni, Ni_2Si и NiSi, при температуре 300°C и структурно однородного слоя орторомбической фазы NiSi в диапазоне температур от 350 до 550°C , который в интервале температур обработки от 400 до 450°C характеризуется размерами кристаллитов от 100 до 200 нм, сглаженной границей раздела с кремнием и высотой барьера $\sim 0,63$ В.

4. Обнаружены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Ni-Pt-V/Si, происходящие после ее быстрой термической обработки (~ 7 с) при температуре от 450 до 500°C некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N_2 , заключающиеся в образовании орторомбической фазы NiSi с трансротационной степенью упорядоченности на эпитаксиальных к подложке доменах $\beta\text{-Ni}_{31}\text{Si}_{12}$, 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, приводя к формированию контакта с высотой барьера $\sim 0,71$ В.

5. Установлены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Ni V/Pt/Si при ее быстрой термообработке (~ 7 с) в интервале температур от 400 до 600°C в атмосфере N_2 , приводящей за счет диффузии Si при температуре 400°C , Ni при температуре 450°C и Pt при температуре выше 500°C в результате последовательности фазовых переходов $\text{PtSi} \rightarrow \text{NiSi} \rightarrow \text{Ni}_x\text{Pt}_y\text{Si}$, соответственно, к формированию на границе раздела с кремнием структурно однородного слоя со сглаженной морфологией и уменьшенной дефектностью границы раздела $\text{Ni}_x\text{Pt}_y\text{Si}/\text{Si}$, в которой при температуре 550°C увеличение толщины пленки Ni-V от 20 до 40 нм обуславливает уменьшение высоты барьера Шоттки от 0,83 до 0,80 В.

Вынесенные на защиту положения оригинальны и принадлежат соискателю, отражая его значительный личный вклад в получение и осмысление результатов проведенных исследований.

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

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации результатов определяется применением в проведенных экспериментах современных и взаимодополняющих методов растровой электронной микроскопии, резерфордского обратного рассеяния, рентгеновского фазового анализа, просвечивающей электронной микроскопии плоских и поперечных сечений, просвечивающей электронной дифракции, атомно-силовой микроскопии, электрофизических измерений тонкопленочных и контактно-барьерных структур. Теоретическая интерпретация экспериментальных результатов развивает сложившиеся представления положений физики полупроводниковых приборов и не противоречит результатам, опубликованным другими авторами. Большой объем экспериментальных исследований обеспечивает достоверность полученных результатов, а также обоснованность научных положений и выводов.

Результаты работы содержат новую информацию в области технологии изготовления диодов Шоттки с максимальной температурой эксплуатации от +100 до +175 °С.

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

Научная значимость результатов диссертации состоит в установлении закономерностей:

1. На основании уравнении нестационарной теплопроводности предложена физико-математическая модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком света постоянной плотности, которая учитывает отражение светового потока от поверхности подложки и температурные зависимости ее теплофизических параметров, и прогнозирует изменение температуры кремниевой пластины от мощности ИК ламп и времени при нагреве от комнатной температуры до 960°С с отклонением менее 2,5 %

2. Экспериментально установлены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Cr/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~7 с) световым потоком постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере азота, заключающиеся в формировании при температуре более 400°С слоя CrSi₂ 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 стабилизации удельного сопротивления слоя CrSi₂ в диапазоне от 2 до 4 мОм·см и формировании сглаженного микрорельефа границы CrSi₂/Si, характеризующейся высотой барьера Шоттки ~ 0,61 В.

3. Выявлены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Ni/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~7 с)

световым потоком постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере азота, заключающиеся в образовывании фазы Ni_2Si при температуре 200°C , силицидного слоя, содержащего фазы Ni , Ni_2Si и NiSi , при температуре 300°C и структурно однородного слоя орторомбической фазы NiSi в диапазоне температур от 350 до 550°C , который в интервале температур обработки от 400 до 450°C характеризуется размерами кристаллитов от 100 до 200 нм, сглаженной границей раздела с кремнием и высотой барьера $\sim 0,63$ В.

4. Обнаружены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе $\text{Ni} - \text{P} - \text{V} / \text{Si}$, происходящие после ее быстрой термической обработки (~ 7 с) при температуре от 450 до 500°C световым потоком постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере азота, заключающиеся в образовании орторомбической фазы NiSi с трансротационной степенью упорядоченности на эпитаксиальной подложке доменах $\beta\text{-Ni}_{31}\text{Si}_{12}$, 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, приводя к формированию контакта с высотой барьера $\sim 0,71$ В.

5. Установлены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе $\text{Ni} - \text{V} / \text{Pt} / \text{Si}$ при ее быстрой термообработке (~ 7 с) в интервале температур от 400 до 600°C в атмосфере азота, приводящей за счет диффузии кремния при температуре 400°C , никеля при температуре 450°C и платины при температуре выше 500°C в результате последовательности фазовых переходов $\text{PtSi} \rightarrow \text{NiSi} \rightarrow \text{Ni}_x\text{Pt}_y\text{Si}$ соответственно к формированию на границе раздела с кремнием структурно однородного слоя со сглаженной морфологией и уменьшенной дефектностью границы раздела $\text{Ni}_x\text{Pt}_y\text{Si} / \text{Si}$, в которой при температуре 550°C увеличение толщины пленки Ni-V от 20 до 40 нм вызывает уменьшение высоты барьера Шоттки от $0,83$ до $0,80$ В.

Практическая значимость выполненных исследований состоит в использовании разработанных технологических процессов получения барьерных слоев на основе силицидов с улучшенными структурными и электрическими характеристиками, сформированных быстрой термообработкой, для создания диодов Шоттки и формирования омических контактов в серийное производство полупроводниковых приборов и интегральных схем в ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», а разработанной физико-математической модели нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком света постоянной плотности в методике градуировки установок быстрой термической обработки, созданными ООО «Перспективные инновационные технологии».

Экономическая значимость диссертационной работы заключается в том, что годовой объем выпускаемой продукции, изготовленной с использованием разработанных технологий, составил $348\,279,39$ тыс. шт. на сумму $3\,352\,118$ белорусских рублей. Предложенные методы формирования контактов и физико-математическая модель нагрева кремниевых пластин могут быть использованы при дальнейшей разработке и внедрение в серийное

производство изделий электронной техники, а также при управлении нагревом в оборудовании для быстрых термообработок.

Социальная значимость результатов диссертации обусловлена возможностями сохранения и увеличения занятости на предприятиях микроэлектроники за счет расширения объемов и видов выпускаемой продукции.

Результаты диссертации также могут быть использованы на предприятиях электронной промышленности при создании выпрямляющих и омических контактов в изделиях электронной техники

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Представленные в диссертации результаты представляются хорошо апробированными и известными научной общественности. Основные положения диссертационной работы достаточно полно представлены в 1 монографии, 17 статьях в научных изданиях, включенных в перечень изданий, и в иностранных научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 8 статьях в других научных изданиях, 21 статье в материалах научных конференций, 17 тезисах докладов на научных конференциях. Также получены 18 патентов на изобретения.

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. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, семи глав с выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и приложений.

Работа написана ясным и четким научным языком. Оформление диссертации, выполненное с применением современных компьютерных средств, не вызывает нареканий.

Автореферат достаточно полно отражает материалы, содержащиеся в диссертации.

8. Замечания по диссертации

1. В работе отсутствует обоснование применения азотной атмосферы для получения силицидных слоев быстрыми термообработками. В то же время научный интерес представляют влияние на структурно-фазовые и барьерные свойства среды термообработки, например в аргоне, в восстановительной среде, в вакууме.

2. В 4 главе недостаточно полно раскрыты факторы, приводящие к формированию волнообразной морфологии слоев дисилицида хрома при быстрой термообработке. При описании соответствующей модели на стр. 80–81 не указаны причины, вызывающие возникновение регулярной структуры микронеровностей.

3. В выводах 3 и 5 по главе 6 на стр. 131 и 132 указано на возможность формировать диоды Шоттки с максимальной температурой эксплуатации + 150 и + 175 °С. Однако в главе 7 на стр. 139 и 141 приведены соответствующие вольт-амперные характеристики диодов Шоттки только для температуры + 125 °С

Тем не менее, перечисленные выше замечания не затрагивают основной сути работы выводы и защищаемые положения и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

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

Диссертационная работа Соловьёва Ярослава Александровича содержит большое количество самостоятельно выполненных им экспериментальных исследований, которые позволили получить новую информацию о закономерностях структурно-фазовых и контактно-барьерных свойств силицидных слоев, сформированных быстрой термообработкой, и их применении в диодах Шоттки для различных температур эксплуатации. Выводы и основные положения, сформулированные в диссертации, опираются на анализ и обобщение многочисленных экспериментальных и расчетных данных, представляются обоснованными, достоверными, аргументированными, не противоречат существующим физическим представлениям и основаны на использовании взаимодополняющих современных методов исследования. При изложении материала работы использован строгий и ясный научный язык с использованием общепринятых терминов. Вышеперечисленное позволяет сделать вывод о соответствии научной квалификации соискателя ученой степени доктора наук.

10. Заключение

Изучение диссертации, ее автореферата и публикаций диссертанта позволяет заключить, что диссертационная работа Соловьёва Ярослава Александровича, «Формирование методом быстрой термообработки барьерных слоев для кремниевых диодов Шоттки с улучшенной энергоэффективностью», представляет собой завершённый научный труд, отвечает всем требованиям ВАК Беларуси, предъявляемым к докторским диссертациям в области технических наук, соответствует требованиям, установленным главой 3 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий – является концептуальным развитием актуального научного направления «фотонные технологии для создания микроэлектронных структур» и содержит, принципиально новые научные результаты, совокупность которых является крупным достижением в области технологии микроэлектроники, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах за:

– разработанную физико-математическую модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны

некогерентным потоком излучения постоянной плотности мощности, основанную 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 $960 \text{ }^\circ\text{C}$ с отклонением менее 2,5 %, что позволяет управлять температурно-временными параметрами полупроводниковых структур. процессов быстрой термообработки полупроводниковых структур;

– 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 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ – в формировании сглаженного микрорельефа границы CrSi_2/Si , характеризующейся высотой барьера Шоттки $\sim 0,61 \text{ В}$, что позволяет создавать барьерные слои с увеличенной в 1,4 раза плотностью прямого тока по сравнению с барьером Mo/Si ;

– установленный 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 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 $\sim 0,63 \text{ В}$;

– 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 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 $\sim 0,71 \text{ В}$;

– установленные закономерности влияния нагрева системы Ni-V / Pt / Si с толщиной слоя Ni-V от 20 до 40 нм и слоя $\text{Pt} \sim 40 \text{ нм}$ импульсом некогерентного излучения постоянной мощности до температуры $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 от 0,83 до 0,80 В.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник
НИЛ 4.6 «Интегрированные
микро- и наносистемы» НИЧ БГУИР,
академик НАН Беларуси и РАН,
доктор технических наук, профессор



Ознакомлен:
Соловьев Д.А.
26.11.2024 г.

**Совет по защите
диссертаций при БГУИР**
«26» ноября 2024 г.
Вх. № 05.02-12/154