

ОТЗЫВ

официального оппонента
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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

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

Детальный анализ содержания диссертации, а также использованных методов позволяет заключить, что диссертация соответствует пунктам 3.2, 3.4, 3.5 паспорта специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах, отрасли наук – технические.

2. Актуальность темы диссертации

В настоящее время создание современных энергосберегающих технологий, обеспечивающих минимальные потери электрической энергии невозможно без использования соответствующей микроэлектронной компонентной базы. К наиболее энергоэффективным устройствам в схемах выпрямления электрического тока относятся диоды Шоттки, использующие выпрямляющие свойства контактов металл – полупроводник. Для создания таких приборов с заданными характеристиками барьеров требуются технологии формирования протяженных бездефектных границ раздела металл – полупроводник. С данной точки зрения наиболее перспективным методом их формирования является диффузионный синтез слоев силицидов быстрой термообработкой металлических слоев на кремнии. Диссертационная работа Соловьёва Я.А. посвящена разработке технологических процессов формирования барьерных слоев диодов Шоттки с управляемыми контактно-барьерными свойствами путем быстрых термообработок систем Cr/Si, Ni/Si, Ni-Pt/Si и Ni/Pt/Si, что, безусловно, указывает на актуальность темы диссертации.

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

В диссертационной работе разработаны новые технологические процессы формирования протяженных барьерных слоев диодов Шоттки с заданными свой-

ствами, предназначенных для эксплуатации в различных температурных диапазонах, и получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана физико-математическая модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности, основанная на уравнении нестационарной теплопроводности, модифицированная путем учитывания коэффициента преобразования мощности источника излучения в плотность мощности потока излучения и известных температурных зависимостей плотности и теплопроводности кремния, степени черноты покрытий рабочей стороны подложек

2. Установлены закономерности изменений структурно-фазовых свойств и высоты барьера в системе Cr/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~ 7 с) некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N₂, заключающиеся в формировании в диапазоне температур от 450 до 500 °С слоя CrSi₂ с волнообразной морфологией поверхности, обусловленной генерацией вакансий за счет эффекта Киркендала и их последующей деформационно-стимулированной диффузией, со сглаженным микрорельефом границы CrSi₂/Si, характеризующейся высотой барьера Шоттки ~ 0,61 В.

3. Выявлены закономерности структурно-фазовых изменений и контактно-барьерных свойств в системе Ni/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~ 7 с) некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N₂, заключающиеся в образовании фазы Ni₂Si при температуре 200 °С, силицидного слоя, содержащего фазы Ni, Ni₂Si 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 и контактно-барьерных свойств в системе Ni-Pt-V/Si, происходящие после ее быстрой термообработки (~ 7 с) при температуре от 450 до 500 °С некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N₂, заключающиеся в образовании орторомбической фазы NiSi с трансротационной степенью упорядоченности на эпитаксиальных к подложке доменах β-Ni₃₁Si₁₂, 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 и контактно-барьерных свойств в системе Ni-V/Pt/Si при ее быстрой термообработке (~ 7 с) в интервале температур от 400 до 600 °С в атмосфере N₂, 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 $\text{PtSi} \rightarrow \text{NiSi} \rightarrow \text{Ni}_x\text{Pt}_y\text{Si}$ 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 °С увеличение толщины пленки Ni–V от 20 до 40 нм обуславливает уменьшение высоты барьера Шоттки от 0,83 до 0,80 В.

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

Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, основаны на использованы адекватного математического аппарата экспериментально подтверждены современными методами исследований структурно-фазовых свойств, включающими растровую и просвечивающую электронную микроскопию, электронографию, обратное резерфордское рассеяние, рентгеноструктурный анализ, атомно-силовую микроскопию, а также электрофизических измерений тонких пленок и контактно-барьерных свойств получаемых силицидов.

По результатам изучения структурно-фазовых и контактно-барьерных свойств силицидов определены оптимальные режимы формирования барьерных слоев для диодов Шоттки в системах Cr/Si, Ni/Si, Ni-Pt/Si, Ni/Pt/Si, обеспечивающие их наилучшую энергоэффективность.

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

Научная значимость результатов диссертации заключается в построении физико-математической модели нагрева кремниевых пластин на базе уравнения стационарной теплопроводности, модифицированной введением коэффициента преобразования электрической мощности источника излучения в плотность мощности потока излучения и известных температурных зависимостей плотности и теплоемкости кремния и степени черноты материала покрытия рабочей поверхности подложки, установлении закономерностей изменений структурно-фазовых и контактно-барьерных свойств систем Cr/Si, Ni/Si, Ni-Pt/Si, Ni/Pt/Si в результате быстрой термообработки (~ 7 с) потоком некогерентного излучения постоянной мощности, направленным на нерабочую поверхность подложки.

Практическая значимость результатов работы состоит в использовании разработанных технологических процессов в серийное производство изделий электронной техники ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» и разработанной физико-математической модели нагрева пластин в системы управления нагревом установок быстрой термической обработки.

Экономическая значимость диссертации определяется объемом выпуска продукции с использованием ее результатов, который в 2023 году составил 348 279,39 тыс. шт. на сумму 3 352 118 белорусских рублей.

Социальная значимость диссертации выражается в сохранении рабочих мест работников предприятия, задействованных в выпуске продукции с использованием ее результатов.

Результаты диссертации рекомендуются для использования на предприятиях по производству изделий микроэлектроники при формировании выпрямляющих и омических контактов.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

По результатам выполненных исследований опубликованы 64 научных печатных работы, включая 1 монографию, 17 статей 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 (из них 1 без соавторов), 8 статей в других научных изданиях, 21 статью в материалах научных конференций, 17 тезисов докладов на научных конференциях. Все разделы диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту, отражены в материалах, опубликованных в печати с участием соискателя. К наиболее значимым можно отнести публикации в журналах «Surfaces», «Известия РАН. Серия физическая», «Доклады национальной академии наук Беларуси», «Доклады БГУИР».

Получены 5 евразийских патентов и 13 патентов Республики Беларусь на изобретения.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями Инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертации.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, выводам и выносимым на защиту положениям.

8. Замечания по диссертации

8.1 Исследования вольт–амперных характеристик проводились для диодов с охранным кольцом. В то же время наиболее энергоэффективной является структура диода Шоттки с МОП-канавками.

8.2 При построении физико-математической модели нагрева кремниевых пластин не учитывалась спектральная зависимость поглощения излучения, падающего на обратную сторону подложки. В формуле (3.1) на стр. 61 и далее коэффициент отражения излучения принят постоянным.

8.3 На электронограммах стр. 76, 92, 109 и 121 не приведены расшифровки рефлексов от кристаллографических плоскостей, что затрудняет сопоставление результатов рентгеноструктурного и электронографического анализов.

8.4 В главе 3 на стр. 69 ошибка в нумерации формулы, вместо (6.9) указано (6.2).

Указанные замечания не затрагивают защищаемые положения либо носят характер описок.

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

Анализ содержания диссертации, уровень поставленных задач, использованные методы исследований и интерпретация полученных результатов позволяет сделать заключение о том, что научная квалификация соискателя соответствует искомой степени доктора технических наук.

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.), соответствует требованиям ВАК, установленным к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

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 микроэлектроника и полученные принципиально новые результаты, совокупность которых является крупным достижением в данной области, включающие:

- физико-математическую модель нагрева кремниевых пластин, облучаемых некогерентным потоком излучения постоянной мощности, основанную на уравнении нестационарной теплопроводности, модифицированную путем учета коэффициента преобразования мощности источника излучения в плотность мощности потока излучения и известных температурных зависимостей плотности и теплопроводности кремния, степени черноты покрытий рабочей стороны подложек, прогнозирующую изменение температуры от мощности источника излучения и времени от комнатной температуры до 960°C с отклонением менее 2,5 %;

- закономерности изменений структурно-фазовых свойств и высоты барьера в системе Cr/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~ 7 с) некогерент-

ным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N_2 , заключающиеся в формировании в диапазоне температур от 450 до 500 °C слоя $CrSi_2$ с волнообразной морфологией поверхности, обусловленной генерацией вакансий за счет эффекта Киркендала и их последующей деформационно-стимулированной диффузией, со сглаженным микрорельефом границы $CrSi_2/Si$, характеризующейся высотой барьера Шоттки $\sim 0,61$ В;

–закономерности структурно-фазовых изменений и контактно-барьерных свойств 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;

–закономерности изменений структурно-фазовых и контактно-барьерных свойств в системе $Ni-Pt-V/Si$, происходящие после ее быстрой термообработки (~ 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 $\beta-Ni_{31}Si_{12}$, 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, приводящие к формированию контакта с высотой барьера $\sim 0,71$ В;

–закономерности изменений структурно фазовых и контактно-барьерных свойств свойств 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 $PtSi \rightarrow NiSi \rightarrow Ni_xPt_ySi$ соответственно к формированию на границе раздела с кремнием структурно однородного слоя со сглаженной морфологией и уменьшенной дефектностью границы раздела Ni_xPt_ySi/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,

Официальный оппонент,
проректор по учебной работе
Белорусского национального
технического университета,
доктор технических наук, профессор



О.К. Гусев