



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

УТВЕРЖДАЮ
Директор департамента науки,
д.т.н., профессор
В.В. Личинин
« 08 » 2019 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Султанова Азрета Оюсовича на тему «Закономерности роста эпитаксиальных пленок β -SiC на кремнии с нанопористым буферным слоем и исследование их физических свойств», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Диссертационная работа Султанова А. О. посвящена исследованию физико-технологических закономерностей процессов образования буферных и эпитаксиальных слоев карбида кремния сфалеритной модификации на пористых подложках кремния, подвергнутых карбидизации из газовой фазы.

Целью диссертационной работы является проведение экспериментальных и теоретических исследований особенностей формирования мезопористого слоя в подложках монокристаллического кремния, его газофазной карбидизации для создания буферного слоя и изучение влияния буферного слоя на характеристики гетероэпитаксиальной структуры 3C-SiC/por-Si.

Актуальность работы

Наиболее освоенным в настоящее время материалом для ЭКБ силовой и СВЧ электроники является карбид кремния широкозонных гексагональных политипных

модификаций (преимущественно, 4H-SiC). В США, Японии, ряде европейских стран организовано масштабное производство подложек, гомоэпитаксиальных структур и силовых приборов на основе 4H-SiC. В России, несмотря на исторически признанный приоритет в части технологии роста объемных кристаллов SiC, в настоящее время аналогичное промышленное производство находится на стадии проведения опытно-конструкторских работ. В отличие от кремниевых, подложки и гомоэпитаксиальные структуры 4H-SiC пока еще характеризуются достаточно высокой стоимостью, что, безусловно, влияет на объемы выпуска ЭКБ на основе карбида кремния. Альтернативной технологией, потенциально пригодной для создания приборов и микросистем различного функционального назначения, является технология гетероэпитаксии 3C-SiC сфалеритной политипной модификации на относительно дешевых подложках кремния. Работы в этом направлении проводятся достаточно давно как в России, так и за рубежом.

В диссертационной работе Султанова А. О. представлен комплекс экспериментальных и теоретических исследований по разработке физико-технологических основ процессов получения из газовой фазы эпитаксиальных пленок 3C-SiC на кремнии с нанопористым буферным слоем. Очевидно, что получение качественных гетероструктур, пригодных для создания конкурентоспособных приборов. микро- и наносистем, невозможно без детальных исследований структуры нанопористого слоя в подложке, особенностей процессов карбидизации и, собственно, эпитаксии 3C-SiC на подготовленную к этим процессам Si подложку. Таким образом, в диссертационной работе Султанова А. О. «Закономерности роста эпитаксиальных пленок β -SiC на кремнии с нанопористым буферным слоем и исследование их физических свойств» решаются актуальные задачи, отвечающие современным тенденциям развития карбидокремниевой электронной компонентной базы и изделий микро- и наносистемной техники.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 155 наименований. Диссертация содержит 127 страниц текста, включающего 54 рисунка и 8 таблиц.

Во введении приведено обоснование актуальности работы, определены цель и решаемые задачи, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор научной литературы по теме диссертации и определены решаемые в ней задачи. Достаточно подробно изложены вопросы, связанные с кристаллической структурой политипов SiC, проведен сопоставительный анализ их основных параметров и характеристик, рассмотрены базовые методы эпитаксии в технологии карбида кремния. Обсуждаются особенности методов гетероэпитаксии полупроводниковых соединений A^3B^5 , A^2B^6 и SiC на пористых подложках. Применительно к гетероэпитаксии SiC приведены известные данные о процессах карбидизации пористых подложек кремния для структур 3C-SiC/por-Si.

Во второй главе диссертации приводятся результаты экспериментальных исследований влияния основных параметров технологического процесса газофазной эпитаксии SiC (температуры Si-подложки, соотношения ростообразующих компонентов Si/C, процессного давления) на основные характеристики как процесса эпитаксии (скорость роста), так и SiC-слоя (морфология, степень совершенства кристаллической структуры, уровень остаточных напряжений). Исследования проводились с применением методов растровой электронной микроскопии, спектральной эллипсометрии, рентгеновской дифракции, ИК Фурье-спектроскопии. На основе полученных результатов проведена оптимизация параметров режимов роста слоев SiC. В этой же главе приведены результаты исследований технологических условий формирования мезопористого слоя в кремниевой подложке с целью его дальнейшего использования в качестве основы буферного карбидизированного слоя. Детально описаны зависимости толщины и объемной плотности пористого слоя от основных параметров процесса электрохимического анодирования кремниевой подложки – плотности тока и времени, а также проведена количественная характеристика микроструктуры мезопористого слоя.

В третьей главе диссертации рассмотрен процесс карбидизации пористого кремния на основе диффузионной модели с привлечением экспериментальных результатов, полученных автором и данных научной литературы. Описана методика программной обработки РЭМ-изображения исходных пористых слоев для количественной характеристики их структуры, оценки средних размеров пор. Установлено, что при образовании структуры 3C-SiC/por-Si наблюдается процесс коагуляции пор, определяемый эффектом Киркендалла. Проведенный анализ экспериментальных данных, связанных с кинетикой роста буферного SiC слоя на пористой подложке кремния, позволил автору сделать вывод о том, что процесс карбидизации протекает по механизму диффузии

углерода и описывается моделью Дила – Гроува с эффективным коэффициентом диффузии. При этом необходимо учитывать процессы коагуляции и зарастания пор в процессе формирования слоя карбида кремния. В рамках предложенной модели получено аналитическое выражение для эффективного коэффициента диффузии углерода в системе 3C-SiC/por-Si.

Четвертая глава диссертации посвящена преимущественно теоретическому анализу механизмов релаксации механических напряжений, возникающих в эпитаксиальных пленках при выращивании структур 3C-SiC/Si и 3C-SiC/por-Si. Рассмотрены вопросы, связанные с распределением напряжений в таких гетероструктурах с учетом влияния деформаций изгиба и плотности дислокаций. Рассчитаны зависимости радиуса кривизны структур и остаточных напряжений от величины пористости буферного слоя. Проведен анализ возникновения дислокаций несоответствия в пленках 3C-SiC гетероструктур, рассчитаны критические толщины пленок, при которых напряжения несоответствия частично компенсируются за счет образования дислокаций на межфазной границе, разделяющей подложку и пленку. В экспериментальных образцах 3C-SiC/Si и 3C-SiC/por-Si методом рентгеновской дифракции определены величины остаточных напряжений. Численные значения сопоставлены с результатами расчетов и результатами исследований других авторов, опубликованными в научной литературе.

В **заключении** диссертации приводятся выводы, в которых сформулированы основные результаты проведенных в диссертационной работе исследований.

Новизна выполненных исследований и полученных результатов, выводов и рекомендаций

Результаты исследований, приведенных в диссертации, обладают несомненной новизной.

1. Впервые при рассмотрении процесса карбидизации кремниевой подложки с мезопористым слоем предложена модель, учитывающая как процессы массопереноса в газовой фазе, так и диффузию в твердом теле, коагуляцию и зарастание пор при формировании слоя 3C-SiC.

2. На основе анализа диффузионных процессов в порах и фазе 3C-SiC получено аналитическое выражение для эффективного коэффициента диффузии в системе 3C-SiC/por-Si.

3. Проведенное исследование механизмов релаксации напряжений несоответствия в гетероструктуре 3C-SiC/Si с буферным слоем мезопористого кремния позволили описать зависимости механических напряжений и деформаций в системе 3C-SiC/por-Si от толщины и пористости буферного слоя.

Значимость полученных результатов для науки и производства

Научная значимость диссертационной работы Султанова А. О. состоит в создании комплексных подходов к управлению механическими напряжениями и деформациями в гетероэпитаксиальных слоях 3C-SiC за счет разработанных методов формирования мезопористого слоя в кремниевой подложке и его последующей карбидизации перед проведением процесса эпитаксии, основанных на исследованиях структуры пор и диффузионных процессов в газовой и конденсированной фазах, а также трансформации пор в процессе эпитаксии 3C-SiC. Разработанные модели и методы позволяют оценить параметры качества гетероструктур 3C-SiC/por-Si на этапах выбора технологических режимов подготовки подложки к эпитаксии и роста эпитаксиального слоя. Все **основные результаты**, полученные автором, **имеют и практическое значение**. Особо следует отметить следующие из них:

- для гетероструктур 3C-SiC/Si, полученных методом эпитаксии из газовой фазы, исследовано влияние основных параметров роста на кристаллическую структуру и морфологию поверхности образцов. По результатам измерений методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и рамановской спектроскопии установлено, что область значений 0,4 - 0,6 соотношения концентраций атомов в газовой фазе [Si]/[C] является оптимальной для эпитаксии пленок 3C-SiC на Si;

- результаты диссертационной работы использовались при выполнении НИОКР в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» по теме: «Разработка технологии производства гетероэпитаксиальных структур на основе карбида кремния и родственных широкозонных полупроводниковых материалов на нанопористых подложках кремния для приборов электроники, микро - и наносистемной техники» (Государственный контракт № 16.523.12.3004 от 13.05.2011).

Разработанные и исследованные в диссертационной работе Султанова А. О. элементы технологического маршрута гетероэпитаксии слоев 3C-SiC/por-Si, методы их

тестирования, а также полученные на их основе количественные результаты и выводы могут служить основой для выбора оптимальных параметров промышленного процесса формирования слоев 3C-SiC на кремниевых подложках с буферным мезопористым слоем.

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать в научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках по карбидокремниевой тематике, проводимых академическими институтами и ВУЗами, такими как ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, ИФП СО РАН, НИУ «МИЭТ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ», предприятиями электронной промышленности АО «Ангстрем», ПАО «Электровыпрямитель», АО «Светлана-Электронприбор».

Оценка содержания диссертационной работы

Сформулированные во введении задачи успешно решены в основной части диссертации. Вместе с тем, к ее содержанию имеются следующие критические замечания:

1. В таблице 1.1 (глава 1 диссертации) автор приводит таблицу сравнения основных параметров политипов карбида кремния, включая подвижности носителей заряда политипов 4H-SiC и 3C-SiC. Приведенные для 4H-SiC данные по подвижностям электронов и дырок в 4H-SiC ошибочны и не соответствуют современным экспериментальным данным.

2. Одной из задач, решаемых в диссертационной работе, является определение условий формирования эпитаксиального слоя 3C-SiC, при которых минимизируется плотность дислокаций несоответствия. Приведены значения плотности дислокаций для трех экспериментальных образцов, полученных при трех временах проведения процесса роста. Сравнить полученные данные с литературными не представляется возможным, поскольку в обзоре литературных источников отсутствуют сведения о плотности дислокаций в исследованных образцах гетероструктур 3C-SiC/Si.

3. Неясно, каким образом эпюры механических напряжений, теоретически рассчитанные в п.4.1 диссертации, подтверждаются расчетом остаточных механических напряжений в экспериментальных образцах гетероструктур 3C-SiC/Si и 3C-SiC/por-Si. Образцы отличаются только временем проведения процесса роста.

4. Анализ упругих напряжений в системе 3C-SiC/Si с пористым слоем, по-видимому, целесообразно проводить в рамках трехслойной модели.

5. В диссертации подробно описаны экспериментальные и теоретические аспекты, связанные с исследованиями пористой структуры Si подложки, процесса и результатов карбидизации буферного слоя из газовой фазы, процесса формирования эпитаксиального слоя 3C-SiC. При этом, практически отсутствует информация о механических, структурных и электрофизических параметрах конечного продукта – гетероструктурах 3C-SiC/por-Si.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы, которая представляет собой целенаправленное, законченное научное исследование, выполненное на современном уровне, вносящее существенный вклад в понимание процессов возникновения и релаксации механических напряжений, происходящих в полупроводниковых гетероструктурах 3C-SiC/por-Si.

Надежность и достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, не вызывают сомнений. Основная их часть опубликована в международных и российских реферируемых журналах, докладывалась автором на различных российских и международных научных конференциях. Автореферат диссертации соответствует содержанию и достаточно полно ее излагает. Текст диссертационной работы написан грамотно и хорошо оформлен.

Заключение

Таким образом, диссертационная работа на тему «Закономерности роста эпитаксиальных пленок β -SiC на кремнии с нанопористым буферным слоем и исследование их физических свойств» является завершенным научным исследованием, полностью отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, в том числе требованиям пунктов 9-14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертации Султанов Азрет Оюсович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников.

Диссертационная работа и настоящий отзыв рассмотрены и утверждены на научно-техническом совете инженерингового центра «Центр микротехнологии и диагностики» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» от 06.11.2019 г., протокол № 5.

Зам. председателя НТС ИЦ ЦМИД,

зам. директора ИЦ ЦМИД, к.т.н.

Секретарь НТС ИЦ ЦМИД, ст.н.с.,к.х.н.



А. Н. Сергушичев



И. К. Хмельницкий

Отзыв составил:

Зам. директора ИЦ ЦМИД,

доцент кафедры МНЭ СПбГЭТУ, к.ф.-м.н.



Ильин Владимир Алексеевич

Адрес организации:

ул. Профессора Попова, д.5, Санкт-Петербург, 197376

Телефон: (812) 234-46-51; факс: (812) 346-27-58; e-mail: info@etu.ru; <https://etu.ru>