

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Горошко Дмитрия Львовича
"Полупроводниковые нанокompозиты на основе кремния и силицидов",
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Диссертационная работа Горошко Д.Л. посвящена экспериментальному изучению процессов встраивания в кремниевую монокристаллическую матрицу нанокристаллитов полупроводниковых силицидов, формированию на их основе нанокompозитных материалов, исследованию их кристаллической структуры, оптических, электрических свойств и определению общих закономерностей и взаимосвязей между структурой и свойствами. **Актуальность** проведенных исследований определяется тем, что высокоплотные наноразмерные включения в объеме кремниевого кристалла представляют фундаментальный и практический интерес, что связано с новыми процессами при заращивании наноразмерных включений (нанокристаллитов), возникновением механических напряжений в решетке и возникновением новых оптических и электрических свойств подобных нанокompозитов. В связи с этим **актуальность** работы, выполненной Горошко Д.Л., не вызывает сомнений.

Высокая практическая значимость работы заключается в возможности технического воплощения большинства результатов, полученных в работе, в частности, обнаруженное линейное магнитосопротивление величиной до 600% в образцах с нанокристаллитами CrSi_2 может быть использовано для создания высокочувствительных датчиков магнитного поля.

Диссертация содержит 267 страниц, включая 125 рисунков, 13 таблиц и список литературы из 207 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы выполненных исследований, ставится цель и описывается совокупность задач для ее

достижения; также приводятся тезисы, отражающие научную новизну и практическую ценность работы, и излагаются защищаемые положения.

В первой главе представлены результаты экспериментального исследования процессов самоорганизации высокоплотных массивов наноразмерных островков дисилицида железа $\beta\text{-FeSi}_2$ и хрома CrSi_2 на поверхности монокристаллического кремния $\text{Si}(001)$ и $\text{Si}(111)$ и влияние поверхностных реконструкций подложки на этот процесс. Сделан вывод о наиболее перспективных способах решения поставленной на этом этапе задачи.

Во второй главе представлены данные экспериментального изучения формирования нанокристаллитов полупроводниковых дисилицидов железа и хрома в кремниевой матрице при заращивании эпитаксиальным кремнием, а также исследование их электрофизических и оптических свойств. Отмечаются особенности механизмов формирования эпитаксиальных слоев кремния на подложках с разной ориентацией и влияние на этот процесс способа формирования островков. Приводятся данные об оптических и электрических свойствах системы со встроенными вдоль плоскости $\text{Si}(111)$ нанокристаллитами CrSi_2 в широком диапазоне температур.

В третьей главе рассматривается формирование монокристаллитных наноконструкций на основе $\beta\text{-FeSi}_2$ и CrSi_2 методом молекулярно-лучевой эпитаксии путем создания многопериодных образцов. Формирование многопериодных наноконструкций со встроенными нанокристаллитами (НК) силицидов железа и хрома выявило необычные явления в характере расположения НК в объеме эпитаксиальных кремниевых слоев. В зависимости от условий формирования НК и ориентации подложки получено их приповерхностное, сосредоточенное по слоям или квазиравномерное распределение внутри покрывающего эпитаксиального слоя кремния. Отмечается существование нового явления – перемещения НК в растущем слое кремния в зависимости от температуры подложки и ее ориентации. Установлено, что НК как дисилицида железа, так и дисилицида хрома

находятся в сжатом состоянии в решетке кремния, но при этом имеют четкую гетерограницу с кремнием и встроены в него бездефектно.

Четвертая глава посвящена экспериментальной апробации подхода к формированию эпитаксиальных слоев кремния на образцах, ионно-имплантированных хромом и железом, а также выращиванию нанокompозитов с двумя типами НК методами молекулярно-лучевой эпитаксии для создания мультикаскадных детекторов с увеличенной чувствительностью в ближней инфракрасной области спектра. В материалах освещается вопрос формирования образцов для получения приборных структур с использованием совмещенной технологии: ионной имплантации, импульсного ионного отжига, очистки в сверхвысоком вакууме и молекулярно-лучевой эпитаксии кремния. Излагаются результаты экспериментальных исследований процесса формирования монокристаллических нанокompозитов со встроенными НК обоих силицидов.

Пятая глава содержит результаты измерений и обобщение приборных свойств выращенных и описанных в предыдущих главах структур. Здесь приводится анализ влияния тех или иных аспектов структуры, состава и морфологии образцов на люминесцентные, фото- и термоэлектрические параметры мезоструктур.

К наиболее **значительным результатам** диссертации необходимо отнести следующее:

1. Установлено, что распределение НК в эпитаксиальных многопериодных нанокompозитах на основе полупроводникового силицида железа и кремния зависит от способа формирования силицида и ориентации подложки Si: квазиравномерное по толщине на Si(001) и приповерхностное на Si(111) – при твердофазном отжиге металла и сосредоточенное по слоям на Si(001) – при реактивном осаждении металла.

2. Доказано, что НК полупроводниковых силицидов CrSi_2 и $\beta\text{-FeSi}_2$, сформированные твердофазной эпитаксией 0.1-0.8 нм металла на Si(111) или Si(001), упруго и бездефектно встраиваются в эпитаксиальный слой кремния.

Несоответствие решеток матрицы Si и CrSi₂ приводит к формированию НК, сжатых на 3.2% в направлении [001], а НК β-FeSi₂ в кремнии сжаты на 2.7% в направлении [100].

3. Установлено, что электронная структура нанокompозитов со встроенными НК как β-FeSi₂, так и CrSi₂, характеризуются непрямым межзонным переходом с энергией 0.33 эВ в НК CrSi₂ и прямым межзонным переходом с энергией 0.83 эВ в β-FeSi₂ независимо от способа их встраивания.

4. Показано, что переходы дырок между локализованными состояниями на гетерогранице НК CrSi₂/Si и кремнием p-типа проводимости обеспечивают транспорт дырок в нанокompозите при температурах 20-40 К с энергией активации 17 мэВ, а неоднородность распределения заряженных НК CrSi₂ в квазидвумерном слое является причиной возникновения линейного магнитосопротивления величиной до 600% при температуре 25 К и магнитном поле 4 Тл.

5. Установлено, что многократное селективное легирование кремниевых нанокompозитов на основе CrSi₂ и Mg₂Si с использованием поверхностных реконструкций сурьмы или алюминия позволяет получить на порядок больший, чем в кремниевой подложке эффективный фактор мощности термоэлектрического преобразования за счет увеличения электропроводности и термоэдс.

6. Установлено, что широкий пик электролюминесценции (0.70-1.05 эВ) при комнатной температуре многопериодных (4-8 шт.) светодиодов со встроенными в p-слой кремния НК β-FeSi₂, сформированных твердофазной эпитаксией, определяется вкладами от НК дисилицида железа и примесно-дислокационных комплексов.

7. Определено, что увеличение фотоотклика в ближней инфракрасной области спектра (0.60-1.0 эВ) кремниевых фотодиодов обеспечивается последовательным встраиванием в p-слой кремниевого p-n перехода НК или

преципитатов CrSi_2 и/или $\beta\text{-FeSi}_2$.

Научная новизна данной работы заключается в: (1) установлении закономерностей процесса встраивания полупроводниковых дисилицидов железа и хрома в кремнии с ориентацией поверхности (111) и (001) и влияния на это поверхностных реконструкций; (2) установлении роли поверхностных реконструкций для легирования таких нанокompозитных систем; (3) наблюдении интенсивной электролюминесценции; (4) улучшении термоэлектрических свойств выращенных нанокompозитов и (5) в расширении спектральной чувствительности приборных структур, изготовленных на основе образцов нанокompозитов с одним и двумя типами встроенных нанокристаллитов.

Обоснованность и достоверность полученных экспериментальных результатов обеспечивается корректным использованием методик проведения экспериментов и обработки полученных данных, применением взаимодополняющих методов исследования вместе с надежным контролем условий выполнения измерений, а также непротиворечивостью сделанных выводов общепризнанным экспериментальным результатам и теоретическим расчетам.

Горошко Д.Л. провел комплексное научное исследование, определил общие закономерности полученных экспериментальных результатов и сделал обоснованные выводы. Обоснованность сделанных выводов основывается на логической связи и целостности всех этапов исследования.

Результаты диссертации апробированы на большом количестве конференций, представлены в 27 статьях в международной и российской печати. Результаты по способам роста структур для электролюминесценции защищены 6 патентами РФ на изобретения и 3 патентами РФ на полезные модели, что подчеркивает практическую направленность части исследований. Диссертация и автореферат диссертации написаны очень грамотно, ясным языком. Содержание автореферата достаточно полно отражает результаты диссертации.

В качестве недостатков работы следует отметить следующее:

1. При формировании островков на поверхности состав определялся методами электронной спектроскопии и не было подтверждающих сведений о составе и структуре методом просвечивающей микродифракции.
2. В первой главе исследовались поверхности образцов с островками дисилицида железа, полученными тремя методами, однако для подложки Si(111) применены только два первых метода (табл. 1). Связано ли это с технологическими трудностями или не было получено значимых результатов?
3. Непонятно можно ли управлять однородностью размеров самоформируемых островков и встраиваемых нанокристаллитов.
4. Не построена математическая модель эффекта движения нанокристаллитов полупроводниковых силицидов железа и хрома в растущем слое монокристаллического кремния
5. Остается непонятным, каковы предельные концентрации примесей в матрице кремния с нанокристаллитами при использовании упорядоченных сверхструктур сурьмы и алюминия?
6. При создании кремниевых светодиодов получен низкий квантовый выход, что обусловлено малым количеством осажденного железа. Возможно ли увеличение квантового выхода до долей - единиц процентов при использовании только встроенных нанокристаллитов?
7. Имеются некоторые стилистические погрешности, опечатки в работе и погрешности в оформлении рисунков, в частности, автор вводит аббревиатуру для обозначения некоторых терминов (например, ТФЭ, РЭ), а потом в тексте опять использует полные формулировки (стр. 9-10 автореферата). На стр. 10 опечатка в словосочетании «латеральными размерами» (1 абзац). В некоторых рисунках невозможно идентифицировать ни по цвету, ни по подписям графики, полученные при различных условиях (рис. 121, 122).

Сделанные замечания не уменьшают ценности представленного в работе материала, который по совокупности является решением важной для науки и практики проблемы. Диссертационная работа Д.Л. Горошко внесла существенный вклад в развитие вопросов физики полупроводников, выполнена на высоком научном и экспериментальном уровне.

Считаю, что диссертационная работа «Полупроводниковые наноконпозиты на основе кремния и силицидов» является законченным научным исследованием и по содержанию полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 N 842, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Горошко Дмитрий Львович, заслуживает присуждения искомой степени по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
«Физика и теоретическая механика»
Дальневосточного государственного
университета путей сообщения

В.В. Криштоп

27.03.2014



В.В. Криштоп

Подпись *Криштопа В.В.*
(подпись) _____

Начальник
отдела кадров *Рудиченко*

