

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Горошко Дмитрия Львовича
"Полупроводниковые нанокомпозиты 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 выполнению комплексных исследований процессов формирования нанокомпозитных материалов на базе монокристаллических кремниевых подложек путем внедрения разными способами кристаллитов или преципитатов полупроводниковых силицидов и изучению их структуры, электрических и оптических свойств. Отличительной особенностью таких структур является малый размер (несколько десятков нанометров) встроенных кристаллитов, что позволяет ожидать в выращенных образцах появления новых, отличных от известных для объемных соединений, свойств. Данный подход создания наноструктурированных материалов является достаточно перспективным, что продемонстрировано обширными экспериментальными и теоретическими исследованиями данного рода объектов. В связи с этим актуальность работы, выполненной Горошко Д.Л., не вызывает сомнения.

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 пяти главах последовательно излагается материал, лежащий в основе диссертационной работы, который был получен, судя по датам публикаций автора, в течение предшествующих 10 лет.

Первая глава посвящена экспериментальному изучению особенностей формирования высокоплотных массивов наноразмерных островков

дисилицидов железа и хрома на кремниевых подложках с различной ориентацией поверхности. Анализируется влияние поверхностных реконструкций на этот процесс и делается вывод о наиболее перспективных способах решения поставленной на этом этапе задачи.

Материал второй главы базируется на выводах, сформулированных в первой главе: приводятся данные о результатах зарашивания эпитаксиальным слоем кремния силицидных островков; отмечаются особенности механизмов формирования эпитаксиальных слоев кремния на подложках с разной ориентацией и влиянием на этот процесс способа формирования островков. Приводятся интересные данные о свойствах системы со встроенными вдоль плоскости Si(111) нанокристаллитами CrSi₂. Созданию многопериодных образцов в виде монолитных нанокомпозитов на основе β -FeSi₂ и CrSi₂ методом молекулярно-лучевой эпитаксии посвящена третья глава. Тщательный анализ структурных данных позволил выявить общие закономерности для такого рода объектов.

Альтернативный подход к получению кремниевых нанокомпозитных структур с преципитатами полупроводникового дисилицида железа и хрома представлен в четвертой главе. В ней освещаются вопросы формирования образцов для получения приборных структур. Излагаются результаты экспериментальных исследований процесса формирования монолитных нанокомпозитов со встроенными нанокристаллитами обоих силицидов. Заключительная, пятая, глава содержит результаты измерений и обобщение приборных свойств выращенных и описанных в предыдущих главах структур. В ней дается анализ влияния тех или иных аспектов структуры, состава и морфологии образцов на люминесцентные, фото - и термоэлектрические свойства мезаструктур.

Диссертантом получен большой объем новых данных, достоверность которых обеспечивается использованием апробированных взаимодополняющих экспериментальных методик. Грамотно выполненная выборка из накопленных результатов и их тщательное сравнение с

использованием теоретических выкладок позволила представить выявленные закономерности в научных статьях в рецензируемых журналах и на конференциях всероссийского и международного уровня. Обоснованность сделанных выводов также основывается на логической связи и, как следствие, целостностью всех этапов исследования.

Научная новизна работы заключается в развитии подхода к формированию монолитных нанокомпозитов со встроенными нанокристаллитами силицидов железа и хрома, образующихся при эпитаксиальном заращивании предварительно сформированных наноостровков, а также в определении особенностей встраивания нанокристаллитов в кремниевую матрицу и демонстрации возможности выращивания многопериодных нанокомпозитных материалов на их основе, в том числе включающих нанокристаллиты разных силицидов.

К наиболее значительным результатам диссертации, определяющих научную новизну и практическое значение необходимо отнести следующее:

1. Экспериментально определены режимы формирования высокоплотных массивов наноостровков силицидов железа и хрома на поверхности Si(111) и Si(001) с концентрацией не менее 10^9 см^{-2} , латеральными размерами 10-50 нм и высотой 2-9 нм.

2. Определены особенности встраивания НК в кремниевую матрицу и показана возможность выращивания многопериодных нанокомпозитных материалов на их основе, в том числе включающих нанокристаллиты разных силицидов.

3. Многократное селективное легирование кремниевых нанокомпозитов с использованием поверхностных реконструкций сурьмы или алюминия (Si(001)-(2×2)-Al и Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -R30°-Sb) позволяет создать материалы n- и p-типа проводимости с увеличенной на порядки проводимостью, термо-ЭДС и фактором мощности

4. Исследования оптических и электрофизических свойств нанокомпозитов со встроенными нанокристаллитами полупроводниковых

силицидов показали, что: (1) проводимость в нанокомпозитах при температурах выше 300 К определяется инжекцией носителей через гетеробарьер НК/кремний; (2) переходы дырок между локализованными состояниями на гетерогранице НК CrSi_2/Si и кремнием р-типа проводимости обеспечивают их транспорт в нанокомпозите при температуре 20-40 К с энергией активации 17 мэВ; (3) неоднородность распределения заряженных НК CrSi_2 в квазидвумерном слое является причиной возникновения линейного магнитосопротивления с величиной до 600% при температуре 25 К и магнитном поле 4 Тл.

6. Показана перспективность использования нанокомпозитов со встроеннымными нанокристаллитами или преципитатами дисилицида железа в качестве светоизлучающих структур и созданы макеты светодиодов, излучающих при комнатной температуре в области длин волн 1.6-1.8 мкм с заметной интенсивностью.

7. Расширение спектральной чувствительности кремниевых фотодиодов в ближнюю инфракрасную область спектра до 0.7 эВ осуществлено за счет встраивания в кремниевый р-слой двух типов нанокристаллов ($\beta\text{-FeSi}_2$ и CrSi_2). Внешняя квантовая эффективность фотопреобразователя с НК $\beta\text{-FeSi}_2$ и CrSi_2 при 120 К составляет 0.2% при энергии 0.9 эВ.

Результаты диссертации аппробированы более чем на 10 зарубежных и 15 российских профильных конференциях, представлены в 27 статьях в международной и российской печати. По материалам диссертации получены 6 патентов РФ на изобретения и 3 патента РФ на полезные модели, что подчеркивает практическую направленность части исследований. Диссертация и автореферат диссертации написаны ясным языком, автореферат точно и в полной мере отображает содержание диссертации.

Замечания по работе.

1. Самоформирование островков силицидов на поверхности кремния не позволяет создать узкое распределение по размерам и обеспечить

последующее формирование нанокристаллитов в матрице кремния с размерами менее 5 нм, что затрудняет получение в них квантово-размерного ограничения.

2. Обнаруженный эффект движения нанокристаллитов полупроводниковых дисилицидов железа и хрома объяснен качественно, но не построена математическая модель. Учитывая сложность впервые обнаруженного эффекта необходимо рекомендовать продолжить исследования в данном направлении.

3. В работе не обсуждаются возможные пути увеличения до единиц процентов полученного низкого квантового выхода светодиодов со встроенными нанокристаллитами дисилицида железа.

4. К недостаткам по оформлению работы можно отнести некоторую небрежность при построении графиков, когда кривые сложно отличить друг от друга из-за мелких символов, или малого контраста линий (например, рис. 6 на стр. 25 и рис. 86 на стр. 170); за редким исключением не указаны погрешности регистрации экспериментальных данных. На изображениях Фурье-преобразования (рис. 36 на стр. 82 и рис. 64 на стр. 128) отмечены рефлексы, однако их расшифровка с указанием индексов или межплоскостных расстояний отсутствует. Подписи к некоторым рисункам (например, к рис. 45, 92, 94) сформулированы не точно.

Сделанные замечания носят в большей степени рекомендательный характер, не снижают ценности полученных в работе результатов, которые являются решением важных для науки и практики задач. Диссертационная работа Д.Л. Горошко внесла существенный вклад в развитие вопросов физики полупроводников. Считаю необходимым особо отметить высокий уровень экспериментальных исследований, которые проведены в диапазоне от температуры жидкого гелия до тысячи и более градусов Цельсия, в сверхвысоком безмасляном вакууме, с использованием самых современных аналитической приборов и методик, что позволило получить надежные результаты, имеющие большую научную ценность и практическую

значимость. Следует отметить также оригинальность и рациональность структуры диссертации, две первые главы которой посвящены не обзору литературы и описанию методик и аппаратуры, как это делается чаще всего, а описанию результатов экспериментальных исследований и их анализу с использованием современных работ других ученых.

Считаю, что диссертационная работа "Полупроводниковые нанокомпозиты на основе кремния и силицидов" является законченным научным исследованием, по содержанию полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении 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.

Заведующий лабораторией радиационного и космического материаловедения Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор,

М. М. Михайлов

Подпись профессора Михайлова М.М. удостоверяю:

Ученый секретарь университета

/Л.С. Петрова/

20.03.2014

