

ОТЗЫВ

*на автореферат диссертации Горошко Дмитрия Львовича
«Полупроводниковые нанокомпозиты на основе кремния и силицидов»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальностям 01.04.10 – физика
полупроводников*

Развитие кремниевой технологии в направлении освоения кремнийсодержащих систем пониженной размерности, включая наноразмерные полупроводниковые силициды, является одной из новых и быстро развивающихся областей в современной физике полупроводников. Несомненным условием и весьма актуальными для развития данной области науки являются экспериментальные работы, рассматривающие формирование наноразмерных кристаллитов полупроводниковых силицидов в кремниевой матрице, которые позволяют заложить новый подход в развитии кремниевой планарной технологии, а также получить и обобщить данные об электронной структуре, оптических и электрических свойствах полупроводниковых нанокомпозитах на основе мультислоев нанокристаллитов (НК) полупроводниковых силицидов и кремния. В диссертационной работе Д.Л. Горошко выполнялись эксперименты от процессов формирования и исследования структуры до оптических, электрических и термоэлектрических свойств материалов, а также свойств приборных меза-структур на их основе с целью определения их перспектив использования в приборной базе фотоники, оптоэлектроники и термоэлектроники.

В диссертационной работе Д.Л. Горошко с общих позиций рассмотрены подходы к встраиванию НК полупроводниковых силицидов железа, хрома и магния в кремний, особенности формирования границ раздела нанокристаллит – монокристаллический кремний, влияние температуры встраивания на эффект перемещения НК в растущем слое монокристаллического кремния, возникающие напряжения кристаллической решетки НК и влияние массивов встроенных НК на изменения ширины запрещенной зоны, оптических и электрических свойств выращиваемых нанокомпозитов. Им разработана методика встраивания мультислоев НК полупроводниковых силицидов железа и хрома на подложках кремния с ориентациями (111) и (001), разработан метод расчета параметров энергетической структуры для мультислойных нанокомпозитов из спектров пропускания и отражения,

Практическая значимость диссертационной работы Д.Л. Горошко

состоит в (1) формировании многопериодных (8-15 слоев) нанокомпозитов на основе встроенных НК CrSi_2 и $\beta\text{-FeSi}_2$ на монокристаллическом кремнии с ориентацией поверхности (001) и (111); (2) определении режимов формирования встроенных в эпитаксиальный слой Si НК $\beta\text{-FeSi}_2$ и CrSi_2 , при которых можно получать их различное пространственное распределение в кремнии: послойное, квазиоднородное и в виде сегрегированного слоя в зависимости от ориентации подложки и способа формирования; (3) определении температуры эпитаксии кремния до 500-550 °С, которая позволяет избежать выхода НК на поверхность структур, сформированных на Si(111); (4) 20-ти кратном увеличении эффективного фактора мощности термоэлектрического преобразования в легированных нанокомпозитах на основе НК CrSi_2 при температуре 480 К по сравнению с кремниевыми подложками; (5) получении интенсивной электролюминесценции в области 0.8-0.85 эВ при комнатной температуре в меза-диодах на основе мультислойных нанокомпозитов с НК $\beta\text{-FeSi}_2$; (6) расширении спектрального диапазона фотоотклика фотодиодов за счет встраивания НК CrSi_2 и $\beta\text{-FeSi}_2$ с разной шириной запрещенной зоны.

К наиболее значительным научным результатам диссертации необходимо отнести следующее:

1. Экспериментально определены режимы формирования высокоплотных массивов наноструктур 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 упруго и бездефектного встраивания нанокристаллитов дисилицидов железа и хрома с размерами 5-15 нм в кремниевую монокристаллическую матрицу и показана возможность выращивания многопериодных нанокомпозитных материалов на их основе, в том числе включающих нанокристаллиты разных силицидов.
3. Выращенные образцы нанокомпозитов, содержащих как НК $\beta\text{-FeSi}_2$, так и CrSi_2 , характеризуются поглощением в ближнем инфракрасном диапазоне, вклад в который дают прямые переходы с энергией 0.83 эВ в $\beta\text{-FeSi}_2$ и непрямые с энергией 0.33 эВ в CrSi_2 .
4. Осуществлено селективное легирование нанокомпозитных материалов на основе НК Mg_2Si и CrSi_2 с помощью поверхностных реконструкций Si(001)-(2×2)-Al и Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-R}30^\circ\text{-Sb}$, соответственно, с целью увеличения эффективности термоэлектрического преобразования в диапазоне температур 300-500 К. Установлено, что многократное селективное легирование кремниевых нанокомпозитов с использованием поверхностных реконструкций сурьмы или алюминия позволяет создать

материалы n- и p-типа проводимости с увеличенной на порядки проводимостью, термо-ЭДС и фактором мощности.

5. Обнаружено увеличение концентрации и уменьшение подвижности основных носителей заряда в нанокомпозитах со встроенными НК полупроводниковых силицидов железа и хрома по сравнению с чистой кремниевой подложкой при температуре 300-500 К. Показано, что увеличение концентрации связано с инъекцией дополнительных носителей заряда в кремний из этих узкозонных соединений, а падение подвижности – с дополнительным рассеянием на гетерограницах НК-кремний.

6. Установлено, что переходы дырок между локализованными состояниями на гетерогранице НК CrSi_2/Si и кремнием p-типа проводимости обеспечивают транспорт дырок в нанокомпозите при температурах 20-40 К с энергией активации 17 мэВ. При этом неоднородность распределения заряженных НК CrSi_2 в квазидвумерном слое является причиной возникновения линейного магнитосопротивления величиной до 600% при температуре 25 К и магнитном поле 4 Тл.

7. Показана перспективность использования нанокомпозитов со встроенными нанокристаллитами или преципитатами дисилицида железа в качестве светоизлучающих структур. 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 $\beta\text{-FeSi}_2$ (с общей толщиной осажденного железа 2.4 нм), сформированных твердофазной эпитаксией, определяется вкладами от НК дисилицида железа и примесно-дислокационных комплексов.

8. 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 $\beta\text{-FeSi}_2$. Установлено, что 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 апробированы на большом количестве конференций, представлены в значительном количестве статей (27) в российской и международной печати, а также в шести патентах РФ на изобретения и патентах РФ на полезную модель. Автореферат диссертации написан ясным языком и не содержит опечаток.

В качестве замечаний к автореферату можно высказать следующие замечания:

1. Необходимо отметить, что метод самоформирования дает широкое распределение по размерам островков силицидов на поверхности кремния. Следовало в работе определить пути получения однородного распределения островков по размерам.
2. В диссертационной работе описан эффект миграции нанокристаллитов, но в тексте автореферата не дана информация о построении математической модели данного эффекта.

В целом, судя по автореферату, диссертационная работа Д.Л. Горошко внесла существенный вклад в развитие физики полупроводников в новом направлении – физике полупроводниковых нанокомпозитов на основе кремния и силицидов, выполнена на мировом научном уровне и отвечает всем требованиям, предъявляемым в Положении ВАК РФ о присуждении ученых степеней и званий к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Зав. лабораторией
Института механики УрО РАН
д.ф.-м.н., профессор

А.В. Вахрушев

Подпись д.ф.-м.н., профессора А.В. Вахрушева заверяю
Ученый секретарь
Института механики УрО РАН
к. ф.-м.н.

А.В. Северюхин



20.03.2014 г.