

УДК 621.315.592

*А. В. МУДРЫЙ¹, Ф. МОФИДНАХАИ¹, В. Д. ЖИВУЛЬКО¹, В. А. ЗИНОВЬЕВ²,
А. В. ДВУРЕЧЕНСКИЙ², П. А. КУЧИНСКАЯ², Ж. В. СМАГИНА²*

СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОСЛОЕВ Ge/Si С ПРОСТРАНСТВЕННО-УПОРЯДОЧЕННЫМИ ГРУППАМИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

¹Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению

²Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова (Новосибирск, Россия)

(Поступила в редакцию 23.04.2014)

Введение. На современном этапе развития полупроводниковой оптоэлектроники гетероструктуры германий–кремний (Ge/Si) с квантовыми точками Ge являются перспективными объектами и вызывают повышенный интерес у исследователей в связи с их уникальными физическими свойствами и возможностью создания на их основе светоизлучающих структур и фотоприемников для инфракрасной (ИК) области спектра [1–8]. Многими интересными физическими свойствами обладают самоорганизующиеся кольцевые структуры Ge нанометровых размеров (квантовые кольца Ge), образующиеся в процессе гетероэпитаксии германия на кремнии [1]. Такие структуры можно отнести к новым объектам для фундаментальных исследований и практических применений [1, 7, 8]. На сегодняшний день туннельно-связанные квантовые точки Ge, упорядоченные в пространстве, можно считать одними из перспективных нанобъектов для формирования на их основе приборов нового поколения, работа которых будет базироваться на законах и принципах квантовой механики [1, 9, 10]. Несмотря на значительные успехи при исследовании физических свойств наноструктур Ge/Si с квантовыми точками (кольцами) Ge, остается ряд нерешенных принципиальных проблем. В частности, не выявлено прямой зависимости энергетического смещения, полуширины и спектральной формы полос люминесценции от геометрических параметров (размеров, формы) квантовых точек (колец) Ge. Кроме этого, необходимо установление различия в механизмах излучательной рекомбинации в квантовых точках (кольцах) Ge для расширения представлений об электронной структуре таких нанобъектов в гетероструктурах Ge/Si. В работе приведены новые данные о структуре и процессах излучательной рекомбинации в наноструктурах Ge/Si с упорядоченными группами самоорганизующихся квантовых точек (колец) Ge.

Технология создания наноструктур и методика эксперимента. Технология формирования пространственных групп трехмерных островков (квантовых точек) Ge, упорядоченных в кольца, основывалась на молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на гетерофазных подложках Si(100) с предварительно созданными на них затравками в виде напряженных нанодисков GeSi и нанокольца GeSi [7, 8]. Идея подхода к формированию пространственно-упорядоченных наноструктур Ge/Si с квантовыми точками (кольцами) Ge состояла в использовании деформации поверхностного слоя над напряженными затравками для управления пространственным расположением растущих островков Ge. Упорядоченные наноструктуры Ge/Si выращивались методом МЛЭ в установке «Riber SiVA-21» Института физики полупроводников СО РАН. Наноструктуры Ge/Si создавались на подложках Si с ориентацией (100) и толщиной ≈ 300 мкм, обладающих *p*-типом проводимости (легирование бором) с удельным сопротивлением $\rho \approx 20$ Ом · см. Для уменьшения влияния внутренних напряжений в наноструктурах Ge/Si на подложке Si методом МЛЭ создавался буферный слой Si толщиной ≈ 150 нм при температуре роста 500 °С. Перед осаждением буферного слоя Si проводилась стандартная очистка и снятие оксидного слоя с подложки Si.

Массив затравочных трехмерных островков GeSi формировался путем осаждения трех слоев Ge при температуре ≈ 700 °С. Количество Ge в каждом из этих слоев составляло семь монослоев (7 МС) Ge. На первые два слоя Ge при температуре 700 °С осаждались разделяющие слои Si толщиной 20 нм, а на третий слой Ge осаждался более тонкий слой Si ~ 5 нм. Таким способом в этих трех затравочных слоях были сформированы большие островки Ge (≈ 150 – 200 нм в диаметре) в форме дисков или колец. Эта трехслойная структура Ge использовалась в качестве затравки для зарождения на них кольцевых цепочек Ge меньшего размера с латеральным размером ≈ 90 – 150 нм в форме hut-кластеров при $T \approx 600$ °С. Поверх затравочных слоев GeSi было сформировано 10 слоев Ge, каждый из которых состоял из 4 МС Ge для образца 1 и 5 МС Ge для образца 2. Десять слоев Ge с островками меньшего размера разделялись слоями Si толщиной ~ 10 нм, которые создавались при температуре ≈ 500 °С. На последней стадии, при температуре осаждения 500 °С, структуры Ge/Si с 13 слоями Ge закрывались слоем Si толщиной 30 нм. Морфология ростовой поверхности исследовалась с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Рентгенодифракционные исследования проводились на дифрактометре ДРОН-3 в Cu-K_α излучении с графитовым монохроматором. Рентгенограммы регистрировались в интервале углов дифракции $2\Theta \sim 40$ – 90° при комнатной температуре. Запись проводилась в режиме непрерывного сканирования с шагом $0,02^\circ$ и временем накопления сигнала $t = 3$ с. При такой съемке рентгенограмм дифракционная картина формировалась за счет отражающих плоскостей (hkl), расположенных параллельно поверхности кремниевой подложки Si и структур Ge/Si, т. е. плоскости (400).

Исследование спектров фотолюминесценции наноструктур Ge/Si проводилось при температуре жидкого гелия $\sim 4,2$ К при непосредственном погружении исследуемых образцов в охлаждающую жидкость. Спектры люминесценции регистрировались с использованием дифракционного монохроматора МДР-23У с фокусным расстоянием зеркального объектива $f \sim 60$ см, оснащенного дифракционной решеткой 600 штр/мм. В качестве детектора оптических сигналов использовался InGaAs *p-i-n*-фотодиод с областью спектральной чувствительности 0,5–1,7 мкм (Hamamatsu, Япония). Электрический сигнал с фотодетектора поступал через высокоомный предусилитель на узкополосный низкочастотный (частота модуляции лазерного излучения составляла ~ 20 Гц) усилитель и преобразовывался в постоянный сигнал на основе метода синхронного детектирования с последующим аналого-цифровым преобразованием и автоматической записью спектров на компьютере. Спектры фотолюминесценции наноструктур Ge/Si регистрировались с использованием в качестве источников возбуждения различных лазеров, работающих на длинах волн 405, 457 и 532 нм. Изменение длины волны лазерного излучения позволяло регистрировать сигналы люминесценции, возникающие от различных толщин, что позволило более детально проанализировать процессы излучательной рекомбинации в структурах Ge/Si.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рис. 1 показана морфология поверхности пространственно-упорядоченных групп nanoостровков германия, сформированных на нанодисках GeSi на заключительной стадии при температуре 600 °С. Представленные изображения были получены с использованием метода СТМ на образцах без покрывающего слоя кремния. Как показали исследования, в зависимости от технологических условий роста могут быть получены как упорядоченные компактные группы из отдельных островков Ge (рис. 1, а, образец 1), так и группы островков, сросшиеся в кольца (рис. 1, б, образец 2). На вставках рис. 1 показан трехмерный (3D) вид отдельных упорядоченных наноколец Ge.

Как видно из рис. 1, в обоих случаях сформированные группы квантовых точек Ge имеют форму «квадратных» колец. Основание таких колец представляет собой структуру, ограниченную с внешней и внутренней стороны двумя вложенными друг в друга квадратами. Формирование упорядоченных в кольца групп 3D островков (квантовых точек) Ge при эпитаксии на гетерофазных подложках Si основывалось на том, что для управления пространственным расположением растущих nanoостровков Ge использовался эффект деформации поверхностного слоя Si над напряженными затравками GeSi. Поэтому островки Ge, созданные в первых трех слоях при температуре осаждения ≈ 700 °С, имеют достаточно большой размер ≈ 200 нм и низкую

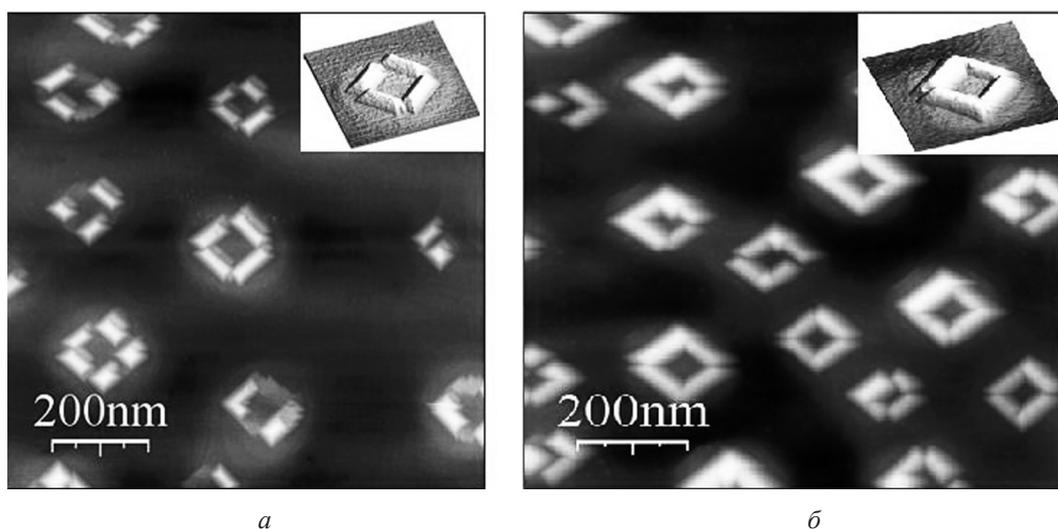


Рис. 1. СТМ-изображение участка поверхности с двумя типами пространственно-упорядоченных эпитаксиальных структур, сформированных на GeSi нанодисках: компактные группы из отдельных наностроек Ge (а) и группы из наностроек, сросшихся в кольца (б). Вставка: трехмерный вид пространственно-упорядоченных наноструктур

плотность. Это необходимо для размещения на них целой группы островков и обеспечения этим группам необходимого отделения друг от друга. Качественно процесс эпитаксии и формирования затравочных островков GeSi может быть объяснен образованием впадин (кратеров) в центре нанокристаллов Ge за счет высокой скорости диффузии Ge из квантовых точек в прилегающие разделяющие слои Si.

Другая модель, объясняющая формирование затравочных островков GeSi, основана на смачивании германием поверхности кремния. Германий, из-за более низкой поверхностной энергии по сравнению с кремнием, стремится закрыть максимально возможную площадь поверхности окружающего кремния. По существу, осаждение Si стимулирует диффузионный массоперенос Ge из вершин трехмерных островков на поверхность смачивающего слоя, что приводит к формированию «вулканоподобных» структур в форме колец. Исследования показали, что на одном затравочном островке Ge подлежащего слоя вырастает целая группа островков меньшего размера с большим содержанием германия. Островки Ge в группах, как правило, были размещены вдоль периметра круговой затравки и обладали преимущественной ориентацией относительно друг друга и кристаллографических направлений типа $\langle 100 \rangle$. При этом их расположение зависело от условий создания подлежащих слоев, а подлежащие островки являлись местом зарождения островков в следующем слое. По данным измерения методом АСМ установлено, что при осаждении 4 МС Ge (толщина одного МС $\approx 0,141$ нм) образовывались островки в форме hut-кластеров с усредненной высотой $\approx 5,2$ нм, шириной ≈ 53 нм, длиной ≈ 92 нм. Дисперсия по размерам не превышала 15 %, а поверхностная плотность кольцевых групп из квантовых точек Ge составляла $\approx 1,1 \cdot 10^9$ см $^{-2}$ (см. рис. 1, а). При осаждении 5 МС Ge островки имели следующие усредненные размеры: высота $\approx 5,6$ нм, ширина ≈ 57 нм, длина ≈ 141 нм (см. рис. 1, б). Поверхностная плотность колец достигала $1,4 \cdot 10^9$ см $^{-2}$. Для выяснения причин упорядоченного расположения островков в группе были проведены расчеты распределения плотности энергии упругой деформации вдоль поверхности напряженного нанодиска GeSi [1]. Они показали, что вблизи периметра круговой затравки имеются 4 локальных минимума плотности упругой энергии, размещенных по направлениям типа $\langle 100 \rangle$ относительно центра затравочного диска GeSi. Установлено, что локальные минимумы энергии обусловлены анизотропией упругих свойств Ge и Si. Исследования начальных стадий роста наностроек методом СТМ в зависимости от количества осажденного Ge показали, что зарождение островков происходит в основном над минимумом упругой энергии, которые соответствуют минимуму химического потенциала на поверхности затравочных нанодисков GeSi. Таким образом, можно считать, что деформация в разделяющем слое Si над напряженными квантовыми кольцами GeSi обеспечивает вертикально-совмещенный коррелированный рост квантовых точек Ge в вышележащих слоях.

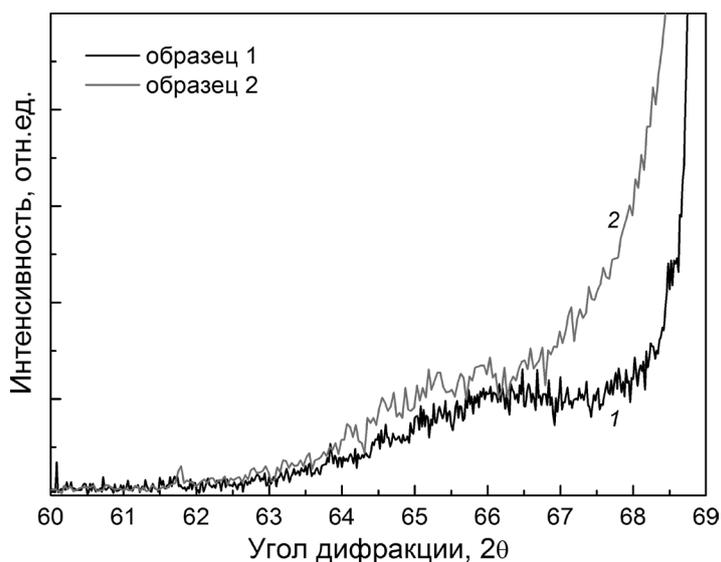


Рис. 2. Рентгенограммы наноструктур Ge/Si с вертикально-совмещенными группами квантовых точек Ge (образец 1) и группами квантовых точек Ge, сросшимися в кольца (образец 2)

На рис. 2 представлены рентгенограммы наноструктур Ge/Si (образцы 1 и 2) с вертикально-совмещенными группами квантовых точек Ge. Исследования показали, что на рентгенограммах в области углов дифракции $2\Theta \approx 69,148^\circ$ присутствует интенсивный рефлекс 400 (на рис. 2, а представлен частично), обусловленный отражением от кремниевой подложки. Наиболее важным является наличие на рентгенограммах дополнительных рефлексов отражения в области меньших значений углов дифракции $2\Theta \approx 66,3^\circ$ и $2\Theta \approx 66^\circ$ для образцов 1 и 2 соответственно. Анализ продемонстрировал, что максимумы отражения в области вышеуказанных углов могут быть отнесены к отражению от плоскости (400) Ge. Определение параметров элементарной ячейки осуществлялось на основании известного условия Брэгга – Вульфа $2d\sin\Theta = \lambda$, (d – межплоскостное расстояние, Θ – брэгговский угол отражения, λ – длина волны падающего рентгеновского излучения) и соотношения $a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$ для решетки с кубической симметрией (a – параметр элементарной ячейки; h, k, l – кристаллографические индексы). Значение параметров элементарной ячейки, найденные по угловому положению рефлексов (400), для Si с $2\Theta \approx 69,148^\circ$, (400) для Ge с $2\Theta \approx 66,3^\circ$ (образец 1) и $2\Theta \approx 66^\circ$ (образец 2) оказались равными: $a \approx 5,430, \approx 5,634$ и $\approx 5,657 \text{ \AA}$ соответственно. Отметим, что значение параметра $a \approx 5,430 \text{ \AA}$ для Si хорошо согласуется с известными данными картотеки JCPDS (№ 89-5012, № 89-2955, № 26-1481). Важно, что рентгеновская дифракция в условиях измерений, проведенных нами, дает информацию только об изменении межплоскостных расстояний в направлении, перпендикулярном плоскости роста. Несколько большее значение параметра элементарной ячейки в направлении, перпендикулярном плоскости роста, для образца 2 по сравнению со значением этого параметра для образца 1 указывает на более высокий уровень деформаций в области квантовых колец, образовавшихся при срастании квантовых точек GeSi в кольцевых группах. Одной из причин обнаруженного различия может выступать несовпадение объемных концентраций Ge в исследуемых наноструктурах Ge/Si. При анализе рентгенодифракционных данных было принято во внимание то, что квантовые точки (кольца) GeSi упруго сжаты в двух латеральных направлениях (x [100] и y [010]), лежащих в плоскости роста структуры, а в вертикальном направлении z [100] (направление, перпендикулярное плоскости роста структуры) квантовые точки подвергнуты напряжению растяжения. Так как квантовые точки, формируемые в процессе гетероэпитаксии Ge на Si (100) подложке, характеризуются малым отношением высоты к размеру основания $\approx 1:10$ и их можно рассматривать как двумерные объекты. Это означает, что деформация в квантовых точках (кольцах) не сильно отличается по величине от деформации упруго напряженного тонкого слоя GeSi, встроенного в наноструктуры Ge/Si. Базируясь на теории упругости и учитывая нелинейную зависимость параметра элементарной ячейки от содержания Ge в недеформированной решетке твердых

растворов SiGe, а также подход, развитый в работе [11], нами была рассчитана зависимость нормальной составляющей параметра элементарной ячейки a^{\perp} от процентного содержания Ge. На основании сравнения расчетных значений параметра элементарной ячейки a^{\perp} с экспериментальной величиной, рассчитанной по данным рентгеновской деформации, нами оценено среднее содержание Ge и величина деформаций в многослойных наноструктурах Ge/Si с квантовыми точками (кольцами) Ge. Так, для образца 1 подгонка расчетного значения a^{\perp} к экспериментальной величине $a = 5,634 \text{ \AA}$ дает среднее содержание Ge $\approx 53,7 \%$, а для образца 2 подгонка к $a \approx 5,657 \text{ \AA}$ дает концентрацию Ge $\approx 59,2 \%$. В соответствии с оценкой, проведенной для образца 1, нормальная компонента тензора деформации для упруго напряженного слоя GeSi составляет $\varepsilon_{zz} \approx 0,0161$, а латеральные компоненты $\varepsilon_{xx}(\varepsilon_{yy}) \approx 0,0212$. Для образца 2 с GeSi островками, сросшимися в кольца, соответствующие значения составили $\varepsilon_{zz} \approx 0,0178$ и $\varepsilon_{xx}(\varepsilon_{yy}) \approx 0,0235$. Отметим, что более высокий уровень деформации в образце 2 по сравнению с образцом 1 может быть не обязательно связан с более высоким содержанием Ge. Наблюдаемое различие в деформациях может обуславливаться различием в форме созданных квантовых точек (колец) Ge. Недавно проведенные измерения комбинационного рассеяния света (КРС) показали, что образцы 1 и 2 имеют практически идентичные спектры КРС [8]. Сравнительный анализ интегральных интенсивностей пиков от связей Ge–Ge ($\approx 298 \text{ см}^{-1}$) и Si–Ge ($\approx 411 \text{ см}^{-1}$) показал, что среднее содержание Ge в обоих типах многослойных структур Ge/Si составляют около 43 %. В то же время оценка содержания Ge на основании рентгеноструктурного анализа дает усредненную величину $\sim 54 \%$. Несоответствие оценок содержания Ge, сделанное методами КРС и рентгеновской дифракции, может указывать на более высокую чувствительность рентгеновской дифракции к неоднородному распределению деформаций в структурах Ge/Si с квантовыми точками Ge.

Проведенные при 4,2 К исследования люминесцентных свойств многослойных структур Ge/Si с вертикально совмещенными квантовыми точками Ge, упорядоченными в кольца, позволили выявить различие в оптических характеристиках образцов 1 и 2. На рис. 3 приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) образцов 1 и 2, снятые со спектральным разрешением $\approx 4 \text{ мэВ}$ при 4,2 К. Видно, что в спектрах ФЛ образца 2 в области 1,07–1,16 эВ наблюдаются относительно узкие линии, обусловленные рекомбинацией экситонов, связанных на атомах бора, как основной легирующей примеси (материал КДБ-20, $\rho \approx 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Линия $BE^{NP} \sim 1,150 \text{ эВ}$ обусловлена бесфононной рекомбинацией экситонов, связанных на атомах бора. Линия $BE^{TA} \sim 1,132 \text{ эВ}$ и $BE^{TO} \sim 1,092 \text{ эВ}$ являются фононными повторениями линии 1,150 эВ с испусканием поперечных акустических фононов TA с энергией 18 мэВ и поперечных оптических фононов TO с энергией 58 мэВ. На рис. 3 в спектральной области 1,07–0,74 эВ наблюдаются полосы ФЛ, которые могут быть отнесены

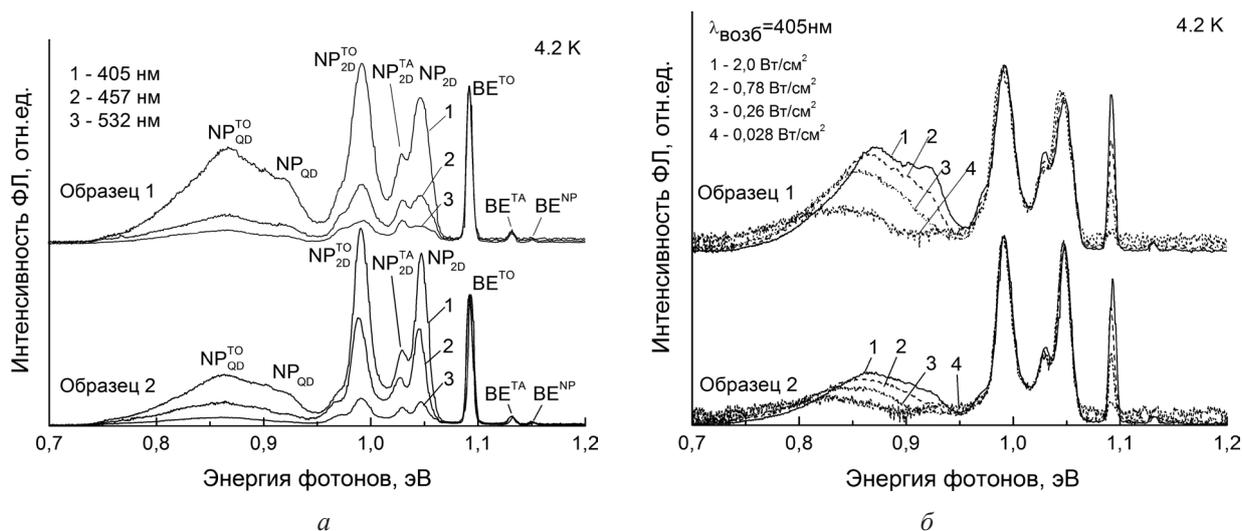


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции наноструктур Ge/Si с упорядоченными группами квантовых точек Ge (образец 1) и группами квантовых точек Ge, сросшимися в кольца (образец 2): зависимость спектров фотолюминесценции от длины волны (а) и мощности (б) возбуждающего лазерного излучения

к рекомбинации в квантовых точках Ge и двумерном (2D) смачивающем слое Ge [12]. Полоса $NP_{2D} \approx 1,047$ эВ может быть отнесена к бесфононным переходам при излучательной рекомбинации свободных экситонов в тонком смачивающем слое Ge, а полосы 1,029 и 0,989 эВ являются повторениями этой линии с участием TA и TO фононов соответственно. Полоса в области 0,974–0,976 эВ может быть отнесена к фононному повторению линии 1,047 эВ с одновременным испусканием двух фононов TO и TA. Появление низкоэнергетических полос $NP_{QD} \approx 0,921$ эВ и $NP_{QD}^{TO} \approx 0,863$ эВ может быть связано с бесфононным процессом излучательной рекомбинации и процессом рекомбинации с участием TO-фононов на квантовых точках Ge. **Эксперименты по возбуждению неравновесных носителей заряда в структурах Ge/Si лазерным излучением с различной длиной волны показали, что использование коротковолнового лазерного излучения с $\lambda \approx 405$ нм позволяет регистрировать сигналы ФЛ в большей степени от поверхностных слоев GeSi. В этом случае излучение от подложки становится слабее. Как видно на рис. 3, при возбуждении лазерным излучением с $\lambda \approx 532$ нм, интенсивность сигналов от наноструктур Ge/Si в области 1,07–0,74 эВ становится значительно меньше относительно интенсивности ФЛ от подложки кремния. Обращает на себя внимание значительно меньшая полуширина полос в области 1,07–0,95 эВ от смачивающего слоя Ge в образце 2 по сравнению с образцом 1. В частности, полуширина головной бесфононной полосы $NP_{2D} \approx 1,047$ эВ для образца 2 составила ≈ 13 мэВ при 4,2 К, в то время как для аналогичной полосы $NP_{2D} \approx 1,046$ эВ в образце 1 она составила ≈ 23 мэВ. Подобное различие в полуширине может объясняться тем, что при создании массива квантовых точек (колец) в структуре с 5 МС создается более однородное их распределение по поверхности, и это уменьшает внутренние напряжения в смачивающих слоях Ge. С другой стороны, процесс срастания квантовых точек Ge в кольцах может также снижать релаксацию напряжений в смачивающих слоях Ge. Поэтому для образца 2 с 5 МС наблюдается меньшая полуширина линии 1,047 эВ. В образце 1 смачивающие слои Ge находятся в более напряженном состоянии из-за большей неоднородности распределения массива групп квантовых точек Ge и отсутствия срастания квантовых точек Ge в кольца, что и обуславливает большую полуширину линии 1,046 эВ (см. рис. 3). На рис. 3, б представлены изменения спектров ФЛ для квантовых точек Ge в зависимости от мощности лазерного излучения. Как видно, при увеличении мощности возбуждения в спектрах ФЛ от исследуемых структур наблюдается широкая спектральная полоса, которая может быть приписана квантовым точкам GeSi. Установлено, что при увеличении мощности лазерного возбуждения максимум длинноволновой полосы смещается в область более высоких энергий фотонов от 0,82 до 0,86 эВ. Наблюдаемый сдвиг спектральной полосы обусловлен, прежде всего, увеличением степени заполнения квантовых точек GeSi электронами и дырками при возрастании уровня лазерного возбуждения. Отметим, что в первую очередь происходит захват дырок на основное состояние в квантовых точках Ge, а уже затем электроны притягиваются к положительно заряженным квантовым точкам, формируя связанные экситоны. Поскольку в массиве самоорганизующихся квантовых точек Ge существует заметный разброс по размерам ($\sim 15\%$), в первую очередь будут заполняться «большие» квантовые точки, имеющие размер больше среднего по ансамблю, так как они формируют более глубокие потенциальные ямы для дырок. По мере увеличения мощности лазерного возбуждения в процесс рекомбинации экситонов вовлекаются квантовые точки меньшего размера, для которых энергия основного состояния дырок лежит ближе к краю валентной зоны кремния, что и приводит к наблюдаемому сдвигу энергий фотонов в область более высоких энергий.**

Закключение. С использованием метода молекулярно-лучевой эпитаксии созданы наноструктуры Ge/Si с группами квантовых точек Ge, упорядоченными в кольца, которые обладают относительно интенсивной люминесценцией в инфракрасной области спектра 0,74–1,06 эВ. Показано, что в зависимости от количества осажденных слоев Ge (4 МС или 5 МС) и параметров затравочных нанодисков GeSi могут быть сформированы упорядоченные группы квантовых точек Ge, состоящие из изолированных или сросшихся в кольца островков. По данным рентгенодифракционных измерений определена концентрация Ge и проведена оценка величины внутренних напряжений в наноструктурах Ge/Si. Показано, что увеличение количества осаждаемых монослоев Ge от 4 до 5 может приводить к уменьшению полуширины полос, обусловленных излучательной

рекомбинацией на смачивающих слоях Ge. Этот эффект объясняется уменьшением величины напряжений в смачивающих слоях Ge. **Обнаруженное смещение спектральных полос от мощности лазерного излучения в области 0,82–0,92 эВ для квантовых точек Ge объясняется увеличением степени заполнения квантовых точек Ge электронами и дырками.**

Работа выполнена по проектам Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф12Р-134, Ф14Р-110.

Литература

1. Zinovyev V. A., Dvurechenskii A. V., Kuchinskya P. A., Armbrister V. A. // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 111, N 26. P. 265501–1–265501–5.
2. Chaisakul P., Marris-Morini D., Issella G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 99, N 14. P. 141106–1–141106–3.
3. Двуреченский А. В., Якимов А. И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73, № 1. С. 71–75.
4. Gatti E., Grilli E., Guzzi M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 93, N 3. P. 031106–1–031106–3.
5. Liang D., Bewers J. E. // Nature Photonics. 2010. Vol. 4, N 8. P. 511–517.
6. Лобанов Д. Н., Новиков А. В., Кудрявцев К. Е. и др. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, вып. 11. С. 1448–1452.
7. Кучинская П. А., Зиновьев В. А., Ненашев А. В. и др. // Изв. вузов. Сер. Материалы электрон. техники. 2011. № 4. С. 42–46.
8. Зиновьев В. А., Двуреченский А. В., Кучинская П. А. и др. // Автометрия. 2013. Т. 49, № 5. С. 6–12.
9. Kiravittaya S., Rastelli A., Schmidt O. G. // Rep. Prog. Phys. 2009. Vol. 72, N 4. P. 046502–1–046502–17.
10. Yakimov A. I., Bloskin A. A., Dvurechenskii A. V. // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81, N 11. P. 115434–1–115434–7.
11. Hartmann J. M., Gallas B., Zhang J., Harris J. J. // Semicond. Sci. Technol. 2000. Vol. 15. P. 370–77.
12. Мудрый А. В., Мофиднахаи Ф., Короткий А. В. и др. // Приборы и методы измерений. 2012. Т. 1, № 4. С. 44–50.

A. V. MUDRYI, F. MOFIDNAKHAJ, V. D. ZHIVULKO, V. A. ZINOVYEV,
A. V. DVURECHENSKII, P. A. KUCHINSKAJA, Zh. V. SMAGINA

STRUCTURAL AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF Ge/Si NANOLAYERS WITH SPATIALY ORDERED GROUPS OF QUANTUM DOTS

Summary

Ge/Si nanostructures with closely spaced and interacting Ge quantum dots were grown by molecular beam epitaxy. It was found that the GeSi quantum rings with closely spaced Ge quantum dots can be formed by choosing suitable deposition rate and temperature of Ge. The unit cell parameters and Ge concentration in Ge/Si nanostructures were determined by the X-ray diffraction method. Intense luminescence bands caused by radiative recombination of excitons from both the Ge wetting layers and Ge quantum dots were found in photoluminescence spectra at 4.2 K.