

Влияние напряженного Si-слоя на фотолюминесценцию Ge(Si) самоформирующихся островков, выращенных на релаксированных SiGe/Si(001)-буферных слоях

© М.В. Шалеев^{*,†}, А.В. Новиков^{*,+}, А.Н. Яблонский^{*}, О.А. Кузнецов^{*}, Ю.Н. Дроздов^{*,+}, З.Ф. Красильник^{*,+}

^{*} Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950, ГСП-105 Нижний Новгород, Россия

[†] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

^{*} Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 12 апреля 2006 г. Принята к печати 24 апреля 2006 г.)

Представлены результаты исследований фотолюминесценции структур с Ge(Si)-самоформирующимися островками, встроенными в напряженный Si-слой. Структуры были выращены на гладких релаксированных $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ ($x = 20\text{--}30\%$) буферных слоях. Обнаруженный в спектрах фотолюминесценции исследованных структур пик фотолюминесценции связывается с непрямым в реальном пространстве оптическим переходом между дырками, локализованными в Ge(Si)-островках, и электронами, локализованными в напряженных Si-слоях над и под островком. Продемонстрирована возможность эффективного управления положением пика фотолюминесценции от данного типа структур путем изменения толщин напряженных Si-слоев. Обнаружено, что при 77 К интенсивность сигнала фотолюминесценции от гетероструктур с Ge(Si)-самоформирующимися островками, заключенными между напряженными Si-слоями, на порядок превосходит интенсивность сигнала фотолюминесценции от структур Ge(Si) с островками, сформированными на Si(001)-подложках.

PACS: 81.07.Ta, 78.55.-m, 78.67.Hc, 71.20.Nr, 68.37.Ps, 81.15.Hi

1. Введение

Ge/Si-гетероструктуры с самоформирующимися островками и квантовыми точками являются весьма привлекательными с точки зрения создания на основе кремния светоизлучающих приборов на используемый в оптоволоконных линиях связи диапазон длин волн 1.3–1.55 мкм. Основанием для этого служит наблюдаемый в этих структурах вплоть до комнатной температуры сигнал электро- и фотолюминесценции в этой области длин волн [1,2]. Значительно меньшее по сравнению со структурами с SiGe-квантовыми ямами температурное гашение сигнала люминесценции от Ge(Si)/Si(001)-самоформирующихся островков связывается с эффективной трехмерной локализацией дырок в островках [3]. Однако из-за реализации в Ge/Si-структурах с островками гетероперехода II-типа в островках возможна локализация только одного типа носителей заряда — дырок. В то же время электроны оказываются лишь слабо локализованными в Si на гетерогранице с островками [4,5]. Небольшая потенциальная яма для электронов на гетерогранице с островком вызвана локальным растяжением кремния вблизи островка и кулоновским потенциалом дырок, локализованных в островках [4,5]. Слабая локализация электронов в структурах с Ge(Si)/Si(001)-самоформирующимися островками является одной из причин относительно низкой эффективности излучательной рекомбинации в этих структурах.

Для решения проблемы локализации электронов в структурах с Ge(Si)/Si(001)-самоформирующимися островками предлагалось использовать осаждение субмонослойных покрытий углерода [6] и рост многослойных структур с островками, разделенными тонкими слоями Si [6,7]. Однако контролировать параметры потенциальной ямы для электронов (глубину и размер в направлении роста) в обоих этих случаях достаточно сложно. Кроме того, введение углерода в Ge/Si-гетероструктуры приводит к росту концентрации центров безызлучательной рекомбинации и, как следствие, к уменьшению эффективности излучательной рекомбинации носителей заряда.

С другой стороны, известно (см., например, [8]), что напряженный (растянутый) Si-слой (ϵ -Si-слой), выращенный на релаксированном $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ -буферном слое, является эффективной потенциальной ямой для электронов. Положение энергетических уровней электронов в такой яме можно контролировать, меняя состав буферного SiGe-слоя и толщину ϵ -Si-слоя. Встраивание Ge(Si)-самоформирующихся островков между напряженными ϵ -Si-слоями, выращенными на релаксированном SiGe-буфере (рис. 1, *a*), могло бы существенно улучшить локализацию электронов на гетерогранице с островком (рис. 1, *b*). Первые опыты по исследованию роста и фотолюминесценции (ФЛ) структур с Ge(Si)-островками, встроенными в напряженный ϵ -Si-слой, показали наличие в спектрах ФЛ этих структур линии, положение которой зависело от толщины ϵ -Si-слоя [9]. Существование данной зависимости позволило связать обнаруженный

[†] E-mail: shaleev@ipm.sci-nnov.ru

сигнал ФЛ с непрямым в реальном пространстве оптическим переходом между дырками, локализованными в Ge(Si)-островках, и электронами, локализованными в ϵ -Si-слое на гетерогранице с островком (рис. 1, *b*).

В данной работе представлены результаты детального исследования влияния толщины ϵ -Si-слоя на положение и ширину пика ФЛ от Ge(Si)-самоформирующихся островков, встроенных в этот слой. Показана возможность эффективного управления положением пика ФЛ от островков за счет изменения толщин ϵ -Si-слоев над и под островками. Продемонстрировано увеличение на порядок интенсивности сигнала ФЛ при 77 К от Ge(Si)-островков, встроенных в напряженный ϵ -Si-слой, по сравнению с сигналом ФЛ от Ge(Si)-островков, выращенных на ненапряженных Si(001)-подложках.

2. Методика эксперимента

Рост исследованных структур был выполнен на „искусственных подложках“ на основе градиентных (ступенчатый градиент доли Ge 5–10%/мкм) релаксированных $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ ($x = 20\text{--}30\%$) буферных слоев, выращенных методом гидридной газовой эпитаксии при атмосферном давлении [10]. С целью уменьшения шероховатости поверхности, выращенные SiGe-буферные слои подвергались химико-механическому полированию (ХМП) [10]. По данным атомно-силовой микроскопии (АСМ), среднеквадратичная шероховатость поверхности релаксированных $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ -буферных слоев с максимальной долей Ge $x = 20\text{--}30\%$ после проведения ХМП была меньше 0.5 нм, что всего в 2–3 раза больше шероховатости поверхности исходных Si(001)-подложек. Плотность прорастающих дислокаций, определенная с помощью селективного травления, для $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -буферных слоев с $x = 20\text{--}30\%$ составляла $\sim 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Исследованные структуры с Ge(Si)-самоформирующимися островками были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Структуры состояли из ненапряженного SiGe-слоя с содержанием Ge, соответствующим содержанию Ge в верхнем слое релаксированного SiGe-буферного слоя (позиция 1 на рис. 1), напряженного ϵ -Si-слоя толщиной $d_1^{\text{Si}} = 1\text{--}3 \text{ нм}$ (позиция 2 на рис. 1), на котором формировались Ge(Si)-островки (позиция 3 на рис. 1). Островки были получены осаждением слоя Ge с эквивалентной толщиной $d_{\text{Ge}} = 7\text{--}12$ монослоев (МС) ($1 \text{ МС} \approx 0.14 \text{ нм}$). В структурах для исследования спектров ФЛ Ge(Si)-островки имели покровный слой, состоящий из еще одного напряженного Si-слоя толщиной $d_2^{\text{Si}} = 1\text{--}3 \text{ нм}$ (позиция 2 на рис. 1), ненапряженного SiGe-слоя (позиция 4 на рис. 1) и тонкого (2 нм) защитного слоя Si (позиция 5 на рис. 1). АСМ исследования морфологии поверхности выращенных структур были проведены на атомно-силовом микроскопе Solver PRO с использованием бесконтактной моды. Рентгенодифракционные исследования выполнены на двухкристальном дифрактометре ДРОН-4. Для регистрации спектров ФЛ применялся фурье-спектрометр

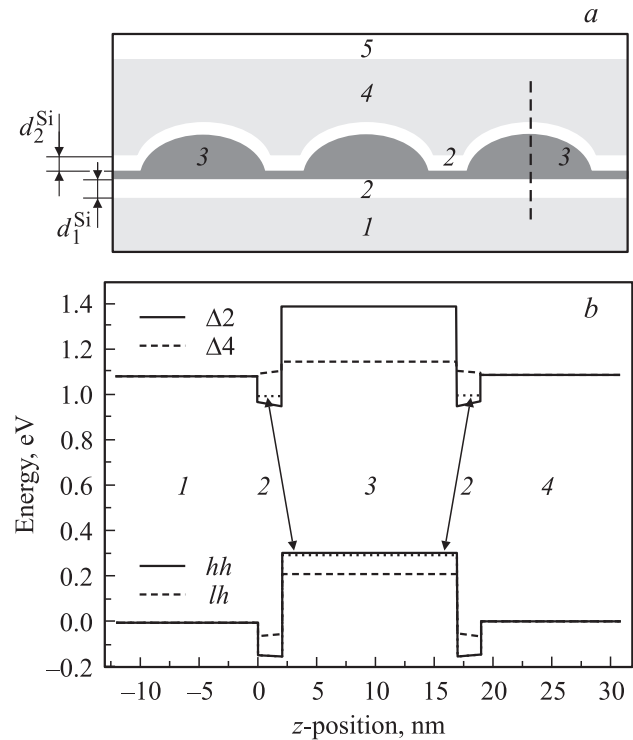


Рис. 1. *a* — схематичное изображение поперечного сечения гетероструктур с Ge(Si)-самоформирующимися островками, заключенными между ϵ -Si-слоями. d_1^{Si} и d_2^{Si} — толщина ϵ -Si-слоя под и над островками соответственно. *b* — рассчитанная зонная диаграмма (вдоль пунктирной линии на рис. 1, *a*) структуры с Ge(Si)-самоформирующимися островками, заключенными между ϵ -Si-слоями. Точечными линиями обозначены положения уровней размерного квантования электронов в ϵ -Si-слоях и тяжелых дырок в Ge(Si)-островке. Стрелками показан не прямой в реальном пространстве оптический переход. Цифрами на рисунках обозначены: 1 — SiGe-буферный слой, 2 — ϵ -Si-слои под и над островками, 3 — Ge(Si)-самоформирующиеся островки, 4 — покровный SiGe-слой, 5 — защитный Si.

ВОМЕМ DA3.36 с охлаждаемыми Ge и InSb детекторами. Для возбуждения сигнала ФЛ использовался ультрафиолетовый ($\lambda = 325 \text{ нм}$) HeCd-лазер. Благодаря большому коэффициенту поглощения ($\alpha \approx 10^6 \text{ см}^{-2}$) излучение этого лазера в Ge/Si-структурах поглощается в тонком приповерхностном слое толщиной $\sim 10 \text{ нм}$. Это позволяет избежать присутствия в исследуемых спектрах пиков дислокационной ФЛ от дефектных областей релаксированных SiGe-буферных слоев [9,11].

3. Результаты и их обсуждение

АСМ исследования структур с Ge(Si)-самоформирующимися островками, выращенными на ϵ -Si-слое (далее Ge(Si)/ ϵ -Si-островки), показали [9,12], что рост Ge(Si)/ ϵ -Si-островков качественно совпадает с ростом Ge(Si)-островков на ненапряженных Si(001)-подложках (далее Ge(Si)/Si-островки). При температурах ро-

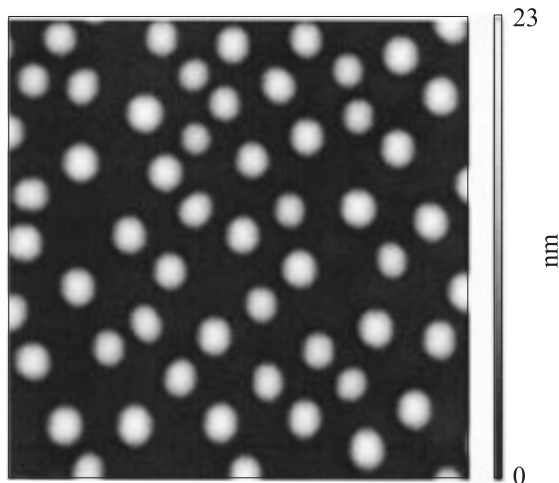


Рис. 2. АСМ снимок поверхности структуры с Ge(Si)-самоформирующимися островками, выращенными на ϵ -Si-слое ($d_1^{\text{Si}} = 2$ нм) при температуре осаждения Ge $T = 650^\circ\text{C}$ ($d_{\text{Ge}} = 11$ МС). Размер снимка 1×1 мкм.

ста $T \geq 630^\circ\text{C}$ и толщине осажденного слоя Ge $d_{\text{Ge}} = 7-8$ МС на поверхности наблюдаются пирамидальные и куполообразные Ge(Si)/ ϵ -Si-островки [9,12]. Как и в случае роста островков на Si(001)-подложках, при увеличении количества осажденного Ge на поверхности происходит уменьшение доли пирамидальных и рост доли куполообразных Ge(Si)/ ϵ -Si-островок [9]. В диапазоне температур осаждения Ge $T = 630-700^\circ\text{C}$ при эквивалентной толщине слоя Ge $d_{\text{Ge}} = 11-12$ МС были получены массивы куполообразных Ge(Si)/ ϵ -Si-островков с разбросом по размерам меньше 10% (рис. 2). В данной работе для исследования спектров ФЛ использовались структуры, в которых однородный массив куполообразных Ge(Si)/ ϵ -Si-островков был образован осаждением при $T = 650^\circ\text{C}$ слоя Ge с эквивалентной толщиной $d_{\text{Ge}} = 11$ МС (рис. 2). По данным АСМ, куполообразные Ge(Si)/ ϵ -Si-островки, выращенные при $T = 650^\circ\text{C}$, имели средний размер в плоскости роста ~ 110 нм, среднюю высоту ~ 20 нм и поверхностную плотность $5 \cdot 10^9$ см $^{-2}$. Средняя доля Ge в таких Ge(Si)/ ϵ -Si-островках, определенная методом рентгенодифракционного анализа в приближении упругонапряженного слоя, составляла около 75% [9,12], что на 10–15% больше, чем в Ge(Si)/Si-островках, выращенных при той же температуре [13].

В спектрах ФЛ структур с Ge(Si)/ ϵ -Si-островками, измеренных при 77 К, наблюдается один пик ФЛ в области 0.6–0.8 эВ, положение которого зависит от толщины ϵ -Si-слоев в структуре (рис. 3). Данный пик ФЛ связывается с непрямым в реальном пространстве оптическим переходом между дырками, заключенными в Ge(Si)-островках, и электронами, локализованными в ϵ -Si-слоях над и под островками (рис. 1, b) [9]. Отсутствие в спектрах ФЛ структур с Ge(Si)/ ϵ -Si-островками сигнала ФЛ от прорастающих дислокаций и дислокаций несоответствия от релаксированного буферного слоя

указывает на то, что носители заряда, фотоиндуцированные излучением HeCd-лазера в тонком приповерхностном слое структуры, эффективно захватываются Ge(Si)/ ϵ -Si-островками и рекомбинируют в них.

На рис. 3 представлены спектры ФЛ структур с Ge(Si)/ ϵ -Si-островками, различающимися только толщинами ϵ -Si-слоев над и под островками. Предполагается, что сами Ge(Si)-островки, заключенные между ϵ -Si-слоями, во всех структурах имели близкие параметры, так как были сформированы при одинаковых условиях роста (температура роста и скорость осаждения Ge). Из рис. 3 видно, что при уменьшении толщин ϵ -Si-слоев над и под островками от $d_1^{\text{Si}} = d_2^{\text{Si}} = 3$ нм до $d_1^{\text{Si}} = d_2^{\text{Si}} = 1$ нм положение пика ФЛ от Ge(Si)/ ϵ -Si-островков смещается в область больших энергий. Обнаруженное смещение связано с тем, что при уменьшении толщин ϵ -Si-слоев в результате квантово-размерных эффектов происходит выталкивание первого энергетического уровня электронов в ϵ -Si-слоях ко дну зоны проводимости SiGe-слоя (см. рис. 1, b). Выталкивание электронного уровня приводит к увеличению энергии непрямого в реальном пространстве оптического перехода и наблюдаемому смещению положения пика ФЛ от Ge(Si)/ ϵ -Si-островков в область больших энергий. Увеличение толщин ϵ -Si-слоев над и под островками в 3 раза (от $d_1^{\text{Si}} = d_2^{\text{Si}} = 1$ нм до $d_1^{\text{Si}} = d_2^{\text{Si}} = 3$ нм) позволяет сдвинуть пик ФЛ в область меньших энергий на 0.125 эВ (рис. 3). Таким образом, меняя толщину ϵ -Si-слоев над и под островками, можно управлять энергетическим положением пика ФЛ в структурах с Ge(Si)/ ϵ -Si-островками.

В спектре ФЛ структуры с Ge(Si)/ ϵ -Si-самоформирующимися островками, заключенными между ϵ -Si-слоями различной толщины ($d_1^{\text{Si}} = 3$ нм, $d_2^{\text{Si}} = 2$ нм), наблюдается пик ФЛ, ширина которого значительно больше, чем ширина пика ФЛ от структур с симметричными ϵ -Si-слоями над и под островками (рис. 3). Увеличение

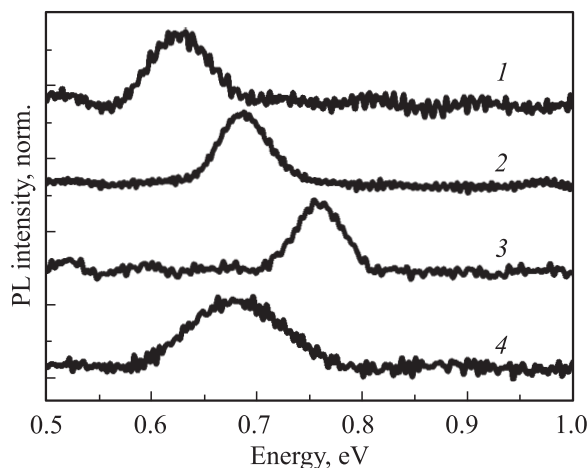


Рис. 3. Спектры ФЛ ($T = 77$ К, InSb-детектор) структур с Ge(Si)/ ϵ -Si-островками, сформированными при 650°C ($d_{\text{Ge}} = 11$ МС). Толщины ϵ -Si-слоев над и под островками составляют: 1 — $d_1^{\text{Si}} = d_2^{\text{Si}} = 1$ нм, 2 — $d_1^{\text{Si}} = d_2^{\text{Si}} = 2$ нм, 3 — $d_1^{\text{Si}} = d_2^{\text{Si}} = 3$ нм, 4 — $d_1^{\text{Si}} = 3$ нм, $d_2^{\text{Si}} = 2$ нм.

ширины пика ФЛ в структурах с несимметричными ϵ -Si-слоями обусловлено наличием в сигнале ФЛ двух пиков, соответствующих рекомбинации носителей заряда в областях над и под островками. Данные пики разнесены по энергии из-за различающихся толщин ϵ -Si-слоев, а следовательно, и различных положений уровней электронов в ϵ -Si-слоях над и под островками (рис. 1, *b*). Разложение широкого пика ФЛ в структуре с различной толщиной ϵ -Si-слоев над и под островками на два пика, аппроксимированных гауссианами, показало примерно одинаковую интенсивность этих пиков, что позволяет говорить о примерно одинаковой вероятности излучательной рекомбинации носителей заряда в областях на верхней и нижней гетерогранице Ge(Si)/ ϵ -Si-островков.

Были проведены теоретические расчеты положения энергетических зон в структурах с Ge(Si)/ ϵ -Si-островками. Дизайн предполагаемой зонной структуры представлен на рис. 1, *b*. В расчетах островки аппроксимировались упругонапряженным SiGe-слоем. Данная аппроксимация возможна, так как высота Ge(Si)/ ϵ -Si-островков до роста покровного слоя в 5–6 раз меньше их латеральных размеров (рис. 2). Для учета уменьшения высоты Ge(Si)/ ϵ -Si-островков при росте покровного слоя в расчетах толщина упругонапряженного SiGe-слоя выбиралась равной 15 нм, что на 5 нм меньше высоты Ge(Si)/ ϵ -Si-островков до роста покровного слоя (рис. 2). Так как энергия размерного квантования дырок в SiGe-слое толщиной больше 10 нм составляет величину меньше 10 мэВ, точный выбор толщины SiGe-слоя оказывает малое влияние на результаты расчетов.

Кроме размеров островков, положение энергетических зон в исследованных структурах зависит от состава и упругих напряжений островков и окружающей их матрицы. Упругие напряжения островков удобно характеризовать величиной остаточных упругих напряжений (RES — residual elastic strain) в островках. Величина остаточных упругих напряжений в островке определялась по формуле

$$\text{RES} = \frac{a_{\text{GeSi}} - a_{\text{isl}}}{a_{\text{GeSi}} - a_{\text{buf}}} \cdot 100\%,$$

где a_{buf} — параметр решетки релаксированного SiGe-буферного слоя, a_{isl} — параметр решетки в плоскости роста островков со средней долей Ge x_{isl} , a_{GeSi} — параметр решетки ненапряженного GeSi-слоя с долей Ge x_{isl} , соответствующей средней доле Ge в островках. В расчетах зонной структуры использовались значения величины RES = 80–90%, полученной ранее для Ge(Si)/Si(001)-островков с покровным Si-слоем [13,14].

Таким образом, единственным подгоночным параметром в расчетах зонной диаграммы Ge(Si)/ ϵ -Si-островков являлся состав островков (доля Ge в островках x_{isl}). В расчетах полагалось, что наблюдаемый пик ФЛ от структур с Ge(Si)/ ϵ -Si-островками связан с прямым в реальном пространстве оптическим переходом между тяжелыми дырками, локализованными в Ge(Si)-островках, и электронами, находящимися в 2Δ -долинах на первом уровне размерного квантования в ϵ -Si-слоях над и под островками (рис. 1, *b*). Результаты расчетов

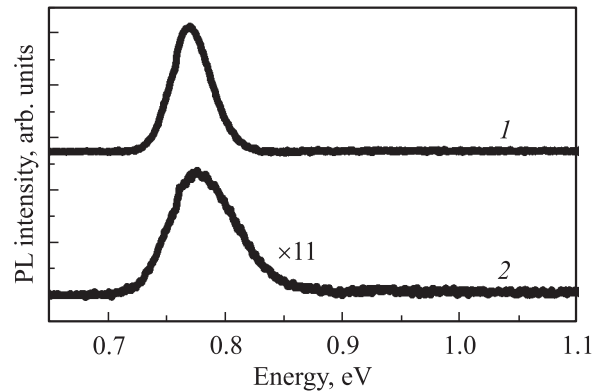


Рис. 4. Спектры ФЛ ($T = 77$ К, Ge-детектор) структур с 1 — Ge(Si)/ ϵ -Si- и 2 — Ge(Si)/Si-островками.

зонной диаграммы для структуры с $d_1^{\text{Si}} = d_2^{\text{Si}} = 2$ нм и $x_{\text{isl}} = 65\%$ представлены на рис. 1, *b*. Начало отсчета на шкале абсцисс совпадает с нижней границей ϵ -Si-слоя, расположенного под островками. Теоретически рассчитанная энергия непрямого в реальном пространстве оптического перехода, определенная из рассчитанной зонной диаграммы, хорошо согласуется с положением максимума сигнала ФЛ от Ge(Si)/ ϵ -Si-островков при использовании в расчетах доли Ge в островках $x_{\text{isl}} = 60$ –70% и величины RES = 80–90%. Полученные значения доли Ge в Ge(Si)/ ϵ -Si-островках с покровным слоем ($x_{\text{isl}} = 60$ –70%) меньше, чем в незарощенных островках ($x_{\text{isl}} \approx 75\%$), что связано с уменьшением доли Ge в островках при росте покровного Si-слоя [15].

Из-за связи пика ФЛ от Ge(Si)/ ϵ -Si-островков с прямым в реальном пространстве оптическим переходом (рис. 1, *b*) сигнал ФЛ от Ge(Si)/ ϵ -Si-островков наблюдается при энергиях, значительно меньших ширины запрещенной зоны объемного Ge (рис. 3). Этот факт определяет использование в наших исследованиях ФЛ структур с Ge(Si)/ ϵ -Si-островками охлаждаемого InSb-детектора, который имеет значительно более низкую по сравнению с охлаждаемым Ge-детектором чувствительность, но более длинноволновую границу спектральной характеристики. Интенсивность сигнала ФЛ от Ge(Si)/Si-островков при использовании HeCd-лазера для возбуждения спектров ФЛ и InSb-детектора для их регистрации очень мала, что затрудняет сравнительный анализ интенсивностей сигналов ФЛ от Ge(Si)/ ϵ -Si- и Ge(Si)/Si(001)-островков. Однако в структурах, в которых Ge(Si)-островки заключены между тонкими ($d_1^{\text{Si}} = d_2^{\text{Si}} = 1$ нм) ϵ -Si-слоями, максимум пика ФЛ от островков расположен при энергии 0.75 эВ (рис. 3) и попадает в область чувствительности Ge-детектора.

На рис. 4 приведены спектры ФЛ структур с Ge(Si)/ ϵ -Si- ($d_1^{\text{Si}} = d_2^{\text{Si}} = 1$ нм) и Ge(Si)/Si-островками, измеренные при 77 К с использованием охлаждаемого Ge-детектора. Из сравнения спектров видно, что интенсивность сигнала ФЛ от Ge(Si)/ ϵ -Si-островков на порядок превосходит интенсивность сигнала ФЛ от Ge(Si)/Si-островков. Столь значительное увеличение интенсивно-

сти сигнала ФЛ от Ge(Si)/ ϵ -Si-островков связывается с эффективной локализацией электронов в потенциальных ямах, образованных ϵ -Si-слоями над и под островками (рис. 1, *b*). В структурах с Ge(Si)/Si-островками глубина потенциальной ямы для электронов на гетерогранице с островком примерно на порядок меньше [4], чем для островков, встроенных в ϵ -Si-слои (рис. 1, *a*), так как в случае Ge(Si)/Si-островков потенциальная яма для электронов образована лишь проникновением упругих напряжений от островков в Si-слои и кулоновским потенциалом дырок, локализованных в островках [4,5]. Эффективная пространственная локализация электронов на границе с Ge(Si)-островком приводит к увеличению вероятности непрямого в реальном пространстве оптического перехода. Кроме того, пространственная локализация электронов в тонком ϵ -Si-слое увеличивает неопределенность значения их импульса и, следовательно, приводит к увеличению вероятности излучательной рекомбинации в Ge/Si-гетероструктуре на основе непрямозонных полупроводников.

4. Заключение

В работе выполнены исследования фотолуминесценции структур с Ge(Si)-самоформирующимися островками, выращенными на гладких релаксированных Si_{1-x}Ge_x/Si(001) ($x = 20-30\%$) буферных слоях и заключенными между напряженными Si-слоями. В спектрах ФЛ исследованных структур обнаружен сигнал ФЛ, который связывается с непрямым в реальном пространстве оптическим переходом между дырками, локализованными в островках, и электронами, локализованными в напряженных Si-слоях над и под островками. Продемонстрирована возможность управления положением пика ФЛ от Ge(Si)/ ϵ -Si-самоформирующихся островков за счет изменения только толщины ϵ -Si-слоев над и под островками. Обнаружено увеличение на порядок интенсивности сигнала ФЛ от Ge(Si)/ ϵ -Si-островков по сравнению с интенсивностью сигнала ФЛ от Ge(Si)-островков, выращенных на Si(001)-подложках. Увеличение интенсивности сигнала ФЛ связывается с эффективной локализацией электронов в напряженных Si-слоях над и под островками.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-02-17336-а), Рособразования (проект РНП.2.1.1.1370) и программы BRHE (проект Y1 P-01-05).

Список литературы

- [1] L. Vescan, T. Stoica. *J. Luminesc.*, **80**, 485 (1999).
- [2] K. Eberl, O.G. Schmidt, R. Duschl, O. Kienzle, F. Ernst, Y. Rau. *Thin Sol. Films*, **369**, 33 (2000).
- [3] H. Sunamura, Y. Shiraki, S. Fukatsu. *Appl. Phys. Lett.*, **66** (8), 953 (1995).
- [4] В.Я. Алешкин, Н.А. Бекин, Н.Г. Калугин, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, В.В. Постников, Х. Сейрингер. *Письма ЖЭТФ*, **67** (1), 46 (1998).

- [5] A.I. Yakimov, N.P. Stepina, A.V. Dvurechenskii, A.I. Nikiforov, A.V. Nenashev. *Semicond. Sci. Technol.*, **15**, 1125 (2000).
- [6] K. Eberl, O.G. Schmidt, O. Kienzle, F. Ernst. *Thin Sol. Films*, **373**, 164 (2000).
- [7] O.G. Schmidt, K. Eberl, Y. Ray. *Phys. Rev. B*, **62**, 16 715 (2000).
- [8] F. Schaffler. *Semicond. Sci. Technol.*, **12**, 1515 (1997).
- [9] M.V. Shaleev, A.V. Novikov, A.N. Yablonskiy, Y.N. Drozdov, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik, O.A. Kuznetsov. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 011 914 (2006).
- [10] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, О.А. Кузнецов, А.В. Новиков, В.А. Перевощиков, М.В. Шалеев. *Микроэлектроника*, **34** (4), 1 (2005).
- [11] N. Usami, K. Leo, Y. Shiraki. *J. Appl. Phys.*, **85** (4), 2363 (1999).
- [12] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, О.А. Кузнецов, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев. *ФТП*, **40**, 235 (2006).
- [13] N.V. Vostokov, Yu.N. Drozdov, D.N. Lobanov, A.V. Novikov, M.V. Shaleev, A.N. Yablonskii, Z.F. Krasilnik, A.N. Ankudinov, M.S. Dunaevskii, A.N. Titkov, P. Lytvyn, V.U. Yukhymchuk, M.Ya. Valakh. In: *Quantum Dots: Fundamentals, Applications, and Frontiers*, ed. by B.A. Joyce et al. (Springer 2005, printed in Netherlands) p. 333.
- [14] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский. *Письма ЖЭТФ*, **76** (6), 425 (2002).
- [15] P. Sutter, M.G. Lagally. *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 3471 (1998).

Редактор Л.В. Беляков

The effect of a tensile-strained Si layer on the photoluminescence of Ge(Si) self-assembled islands grown on relaxed SiGe/Si(001) buffer layers

M.V. Shaleev*, A.V. Novikov*^{+,}, A.N. Yablonskiy*, O.A. Kuznetsov*, Yu.N. Drozdov*^{+,}, Z.F. Krasilnik*⁺

* Institute for Physics of Microstructures
Russian Academy of Science,
603950, GSP-105 Nizhny Novgorod, Russia
+ Nizhny Novgorod State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia
• Physical-Technical Research Institute,
Nizhny Novgorod State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The photoluminescence (PL) of structures with Ge(Si) self-assembled islands embedded in tensile-strained Si layer were studied. The structures were grown on the smooth relaxed Si_{1-x}Ge_x/Si(001) ($x = 20-30\%$) buffer layers. The PL peak obtained in PL spectra of studied structures is connected with an real space indirect optical transition between holes localized in Ge(Si) islands and electrons localized in tensile-strained Si layers under and above the islands. The possibility of the effective control of the PL peak position by changing the thickness strained Si layers were shown. It is revealed that the PL intensity at 77 K from heterostructures with Ge(Si) self-assembled islands located between tensile-strained Si layers is an order of magnitude higher than the PL intensity from structures with Ge(Si) islands grown on Si(001) substrates.