

Влияние радиационного воздействия на люминесцентные свойства низкоразмерных гетероструктур SiGe/Si(001)

© А.В. Новиков[¶], А.Н. Яблонский, В.В. Платонов*, С.В. Оболенский⁺, Д.Н. Лобанов, З.Ф. Красильник

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

* Саровский физико-технический институт,
607183 Саров, Россия

⁺ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 9 июля 2009 г. Принята к печати 8 августа 2009 г.)

Выполнены исследования влияния радиационного воздействия на люминесцентные свойства низкоразмерных гетероструктур Si/Ge с различной степенью пространственной локализации носителей заряда. Показано, что радиационная стойкость гетероструктур Si/Ge увеличивается по мере роста эффективности локализации носителей заряда в них. Пространственная локализация носителей заряда в SiGe-наноструктурах уменьшает вероятность их безызлучательной рекомбинации на радиационных дефектах, созданных в Si-матрице. Продемонстрировано, что наибольшей радиационной стойкостью из исследованных структур обладают люминесцентные свойства многослойных структур с самоформирующимися Ge(Si)-наноструктурами, в которых реализована наиболее эффективная пространственная локализация носителей заряда: трехмерная для дырок в островках и двухмерная для электронов в Si-слоях, разделяющих соседние слои с островками.

1. Введение

Низкоразмерные полупроводниковые гетероструктуры привлекают к себе все большее внимание. Пространственная локализация носителей заряда приводит к существенному отличию электрофизических и оптических свойств низкоразмерных структур по сравнению с объемными полупроводниками. В последнее время было обнаружено, что низкоразмерные структуры на основе различных гетеропар (InGaAs/GaAs [1], AlAs/GaAs [2] и Si/Ge [3,4]) имеют более высокую радиационную стойкость, чем объемные материалы, из которых они состоят. Среди широкого класса полупроводниковых гетероструктур можно выделить структуры Si/Ge, которые совместимы с современной кремниевой технологией. Это позволяет использовать их как для совершенствования традиционных элементов кремниевой нано- и микроэлектроники, так и для создания новых электронных и оптоэлектронных устройств [5]. В частности, гетероструктуры Si/Ge с самоформирующимися наноструктурами и квантовыми точками являются перспективным материалом для создания на кремниевых подложках светодиодов и фотодиодов на диапазон длин волн 1.3–1.55 мкм [6,7]. В данной работе представлены результаты исследования влияния радиационного облучения на люминесцентные свойства гетероструктур Ge/Si с различной степенью пространственной локализации носителей заряда.

2. Методика эксперимента

Исследованные гетероструктуры Si/Ge были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии из

твердых источников на подложках Si(001). Исследовались структуры с SiGe-квантовой ямой (КЯ), тонким слоем Ge, с одним слоем самоформирующихся Ge(Si)-наноструктур и многослойные структуры с Ge(Si)-наноструктурами. Структуры с КЯ выращены при 700°C, а с наноструктурами — при 600°C. При данных условиях роста (температуре и толщине осажденного Ge) в структурах с островками формируется массив куполообразных Ge(Si)-наноструктур высотой 10–12 нм, размером в плоскости роста 65–75 нм и поверхностной плотностью $\sim 10^{10}$ см⁻². Более подробно условия роста исследованных структур описаны в работах [8–10]. Спектральные измерения фотолюминесценции (ФЛ) были выполнены с помощью фурье-спектрометра „Bomet“ DA3-36 при температурах 77 и 300 К. Для возбуждения сигнала ФЛ использовался лазер Nd:YAG с длиной волны излучения $\lambda = 532$ нм. Спектры ФЛ регистрировались с помощью охлаждаемого Ge-фотоприемника, низкоэнергетическая граница спектральной характеристики которого составляет 0.7 эВ.

Исследования дозового воздействия ионизирующего излучения проводились при импульсном облучении электронами с энергиями 2 и 4 МэВ с относительно низкой интенсивностью электронного пучка. Величина дозы составляла соответственно 0.6 и 20 Мрад. В качестве источников нейтронов использовался импульсный реактор с характерной энергией нейтронов ~ 1 МэВ и флюенсом до 10^{15} см⁻².

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

По мере увеличения эффективности пространственной локализации носителей заряда исследованные

[¶] E-mail: anov@ipm.sci-nnov.ru

SiGe-структуры можно расположить следующим образом:

— „слабая“ двумерная (2D) локализация дырок — структура с КЯ $\text{Si}_{0.93}\text{Ge}_{0.07}$ ($d = 5$ нм), в которой формируется потенциальная яма для дырок, глубина которой ($\Delta E_v \approx 50$ мэВ) сравнима с тепловой энергией носителей заряда;

— 2D локализация дырок — структура с Ge-КЯ ($d = 0.6$ нм), являющейся глубокой ямой для дырок ($\Delta E_v \approx 175$ мэВ с учетом эффектов размерного квантования);

— трехмерная (3D) локализация дырок и „слабая“ локализация электронов — структура с одним слоем самоформирующихся Ge(Si)-наностроек, в которой островки являются трехмерной глубокой потенциальной ямой для дырок ($\Delta E_v \gtrsim 300$ мэВ), а для электронов реализуется потенциальная яма меньшей глубины ($\Delta E_c \lesssim 50$ мэВ) на гетерогранице с островком [11];

— 3D локализация дырок и 2D локализация электронов — многослойная структура с Ge(Si)-наностройками, в которой дырки локализованы в островках, а электроны — в Si-слоях, разделяющих соседние слои с островками [11].

При рассмотрении влияния высокоэнергетического облучения на люминесцентные свойства структуры $\text{Si}_{0.93}\text{Ge}_{0.07}$ -КЯ необходимо учесть, что из-за малого ($\Delta E_v \approx 50$ мэВ) разрыва валентной зоны на гетерогранице Si/SiGe дырки при температурах $T \gtrsim 77$ К, при которых были выполнены измерения спектров ФЛ, уже имеют достаточную тепловую энергию, чтобы покинуть SiGe-слой. В результате в спектрах ФЛ структуры с $\text{Si}_{0.93}\text{Ge}_{0.07}$ -КЯ, измеренных при 77 К, до облучения наблюдается сигнал только от Si-подложки, Si-буферного и покровного слоев (спектр 1 на рис. 1). Поэтому на примере этой структуры может быть рассмотрено влияние радиационного воздействия на люминесцентные свойства кремния.

Облучение электронами с малой (0.6 Мрад) дозой приводит к падению интенсивности сигнала межзонной ФЛ от Si в спектрах, измеренных при 77 К, и появлению сигнала от радиационных дефектов (спектр 2 на рис. 1). Сигнал ФЛ от дефектов можно разделить на два вида: широкая полоса в области 0.7–1.0 эВ и узкие линии ФЛ, связанные с конкретной комбинацией атомов в радиационном дефекте (рис. 1). В частности, после облучения электронами малой дозой в спектрах ФЛ возникает так называемая G-линия, которая связывается с комплексом, в который входит междузельный атом углерода и атом углерода в положении замещения, и C-линия, связываемая с комплексом атомов кислород-углерод (рис. 1) [12]. При увеличении дозы облучения происходит резкое падение интенсивности сигнала межзонной ФЛ и рост интенсивности сигнала от дефектов (спектр 3 на рис. 1). При этом интенсивность сигнала ФЛ от G-линии становится в несколько раз больше интенсивности сигнала ФЛ, связанной с межзонной рекомбинацией носителей заряда в Si.

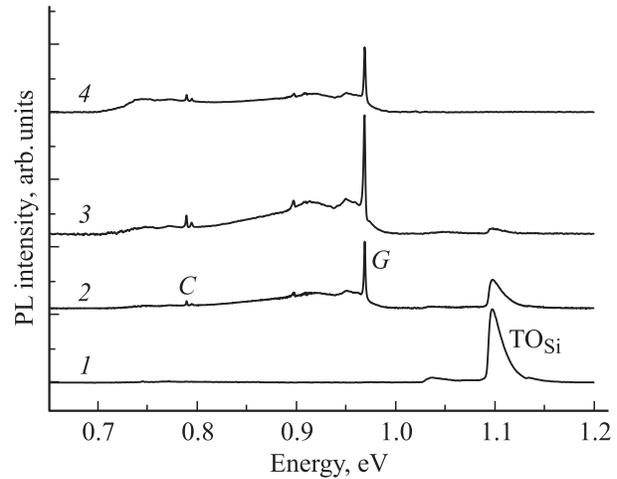


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции структуры с квантовыми ямами $\text{Si}_{0.93}\text{Ge}_{0.07}$ до облучения (1), после облучения электронами с различными дозами (2 — 0.6 Мрад, 3 — 20 Мрад) и нейтронами дозой 10^{15} см $^{-2}$ (4). На рисунке отмечены: линия поперечных оптических фононов от Si слоев (TO_{Si}) и линии, связанные с комплексами дефектов (линии G и C). Спектры измерены при 77 К, нормированы на спектральную характеристику детектора и разнесены по вертикальной оси для наглядности.

Проведенные исследования показали, что наибольшее влияние на спектры ФЛ структуры с $\text{Si}_{0.93}\text{Ge}_{0.07}$ -КЯ оказывает облучение нейтронами. В результате воздействия на эту структуру потоком нейтронов с дозой 10^{15} см $^{-2}$ в спектрах ФЛ исчезает сигнал межзонной ФЛ и наблюдается только сигнал от дефектов (спектр 4 на рис. 1). Данный факт связывается с тем, что в результате радиационного воздействия потоком нейтронов в кремнии образуются не только точечные радиационные дефекты и их комплексы, но также более крупные кластеры дефектов (разупорядоченные области). Поврежденные области кристалла являются эффективными центрами безызлучательной рекомбинации носителей заряда.

Глубина потенциальной ямы для дырок в Ge-КЯ в несколько раз больше, чем в $\text{Si}_{0.93}\text{Ge}_{0.07}$ -КЯ ($\Delta E_v \approx 175$ мэВ для Ge-КЯ и $\Delta E_v \approx 50$ мэВ для $\text{Si}_{0.93}\text{Ge}_{0.07}$ -КЯ). Глубина потенциальной ямы для дырок в исследуемой Ge-КЯ близка к максимальной, которую можно получить в планарных SiGe-структурах, сформированных на Si(001), так как ее толщина близка к критической толщине двумерного роста Ge на Si(001). При большей толщине осажденного Ge происходит образование самоформирующихся наностроек и квантовых точек. В спектре ФЛ структуры с Ge-КЯ, измеренном при 77 К, до облучения, кроме линий межзонной ФЛ от Si-слоев, наблюдаются две линии, связанные с рекомбинацией носителей заряда в Ge-слое без участия фононов (NP_{WL}) и с участием поперечного оптического фонона (TO_{WL}) (спектр 1 на рис. 2).

Сравнение спектров облученных структур с квантовыми ямами $\text{Si}_{0.93}\text{Ge}_{0.07}$ и Ge показывает, что влияние как

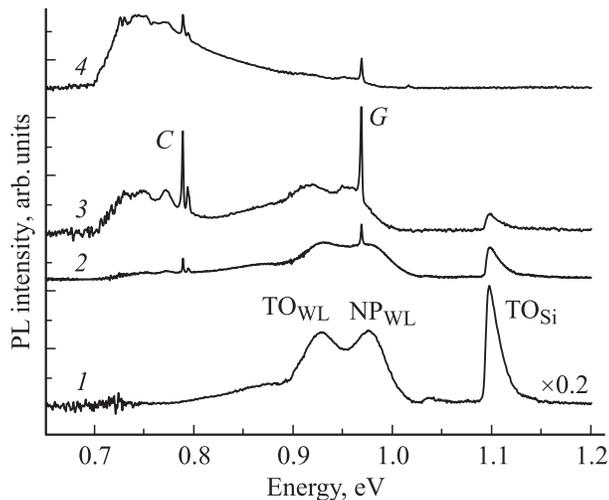


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции структуры с Ge квантовыми ямами до облучения (1), после облучения электронами с различными дозами (2 — 0.6 Мрад, 3 — 20 Мрад) и нейтронами дозой 10^{15} см^{-2} (4). NP_{WL} и TO_{WL} — линии фотолуминесценции от Ge квантовых ям, связанные с излучательной рекомбинацией носителей заряда без участия фона и с участием ТО фона соответственно. Спектры измерены при 77 К, нормированы на спектральную характеристику детектора и разнесены по вертикальной оси для наглядности.

электронного, так и нейтронного облучения на спектры ФЛ этих структур качественно совпадают (рис. 1 и 2): радиационное воздействие приводит к уменьшению сигнала межзонной ФЛ, появлению интенсивного сигнала от дефектов и примесных комплексов в виде широкой полосы ФЛ и отдельных узких линий (рис. 1 и 2). Для обеих структур наиболее существенное влияние на спектры ФЛ оказывает нейтронное облучение. Относительное уменьшение интенсивности сигнала ФЛ от Ge-КЯ после радиационного воздействия меньше, чем для объемного кремния. Сигнал ФЛ от Ge-КЯ сохраняется и после облучения электронами с большой (20 Мрад) дозой (спектр 3 на рис. 2). После же нейтронного облучения сигнал от Ge-слоя сложно выделить на фоне широкой полосы от дефектов ФЛ (спектр 4 на рис. 2).

В спектре ФЛ структуры с одним слоем самоформирующихся Ge(Si)-наноструктур при 77 К до облучения помимо сигнала от Si наблюдается широкий пик ФЛ в области 0.7–0.9 эВ (рис. 3), который связывается с рекомбинацией дырок, локализованных в островках, и электронов, находящихся в окружающей Si-матрице [13,14]. Глубина потенциальной ямы для дырок в Ge(Si)-островках больше, чем в Ge-КЯ, и составляет $\Delta E_v \approx 300 \text{ мэВ}$ [11,13]. Благодаря такому большому разрыву в валентной зоне дырки остаются локализованными в островках вплоть до комнатной температуры. В результате этого сигнал ФЛ от островков в необлученных структурах наблюдался вплоть до комнатной температуры [8,9]. Максимальная же температура, при которой наблюдается сигнал ФЛ от Ge-КЯ, составляет $\sim 100 \text{ К}$.

Из рис. 3 видно, что облучение электронами с малой дозой оказывает слабое влияние на интенсивность сигнала от островков в области 0.8 эВ, но приводит к заметному падению сигнала межзонной ФЛ. В структурах, облученных электронами с большой дозой, сигнал ФЛ от островков присутствует на фоне полосы ФЛ от дефектов (спектр 3 на рис. 3). Слабый сигнал ФЛ от Ge(Si)-островков может быть выделен в спектре структуры, подвергнутой воздействию пучка нейтронов (спектр 4 на рис. 3). В то же время сигнал межзонной ФЛ объемного Si в этой структуре отсутствует, что указывает на более высокую радиационную стойкость излучательных свойств Ge(Si)-наноструктур по сравнению с излучательными свойствами объемного Si.

Проведенные исследования показали, что наибольшей стойкостью к радиационному воздействию среди исследованных светоизлучающих SiGe-гетероструктур обладает многослойная структура с самоформирующимися Ge(Si)-наноструктурами (рис. 4). Эта структура представляет собой *p-i-n*-диод, в нелегированную область которого встроена 20-слойная сверхрешетка. Слои с Ge(Si)-островками разделены Si-слоями толщиной 30 нм [9]. В такой структуре реализуется трехмерная локализация дырок в островках и локализация электронов в Si напряженных слоях, разделяющих соседние слои с островками [11].

Сигнал ФЛ от островков многослойной структуры наблюдается после всех исследованных видов радиационного воздействия, в то время как межзонная ФЛ пропадает после облучения электронами с большой дозой и после воздействия нейтронов (рис. 4). (Спектр ФЛ структуры после нейтронного облучения на рис. 4 не

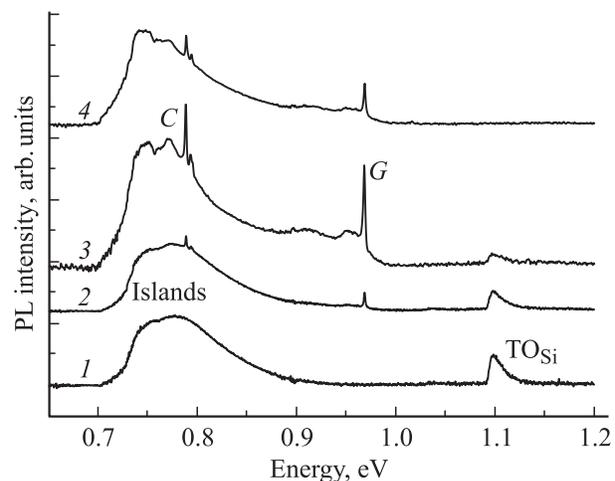


Рис. 3. Спектры фотолуминесценции структуры с одним слоем Ge(Si)-островков до облучения (1), после облучения электронами с различными дозами (2 — 0.6 Мрад, 3 — 20 Мрад) и нейтронами дозой 10^{15} см^{-2} (4). Широкий пик фотолуминесценции в области 0.7–0.9 эВ связан с излучательной рекомбинацией носителей заряда в островках. Спектры измерены при 77 К, нормированы на спектральную характеристику детектора и разнесены по вертикальной оси для наглядности.

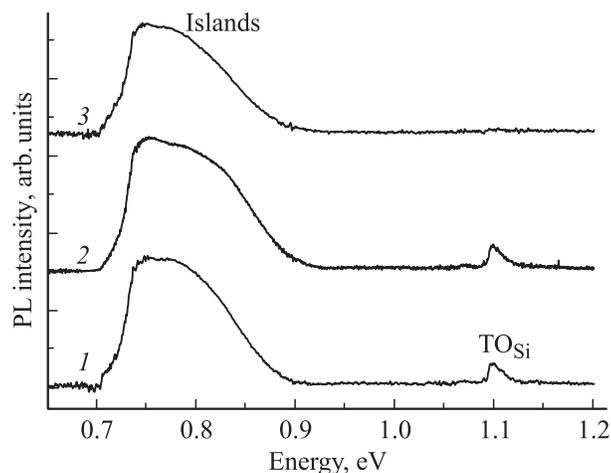


Рис. 4. Спектры фотолуминесценции многослойной диодной структуры с Ge(Si)-островками до облучения (1) и после облучения электронами с различными дозами (2 — 0.6 Мрад, 3 — 20 Мрад). Спектры измерены при 77 К, нормированы на спектральную характеристику детектора и разнесены по вертикальной оси для наглядности.

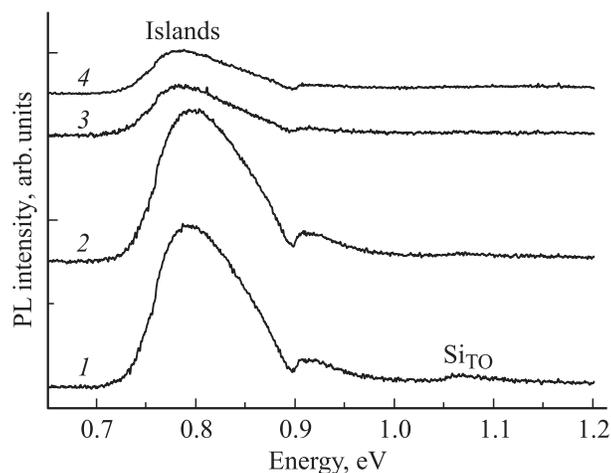


Рис. 5. Спектры фотолуминесценции многослойной диодной структуры с Ge(Si)-островками, измеренные при комнатной температуре до облучения (1), после облучения электронами с различными дозами (2 — 0.6 Мрад, 3 — 20 Мрад) и нейтронами дозой 10^{15} см^{-2} (4). Провал в спектрах в области 0.9 эВ связан с поглощением в кварцевом делителе фурье-спектрометра. Спектры разнесены по вертикальной оси для наглядности.

показан, так как он аналогичен спектру ФЛ структуры, облученной электронами с большой дозой). В спектрах ФЛ многослойной структуры после радиационного воздействия отсутствуют узкие линии от комплексов дефектов (рис. 4), что может указывать на то, что большая часть фотовозбужденных носителей заряда локализована в островках, где они рекомбинируют, не достигая облученных областей кремния, в которых формируются комплексы дефектов.

Влияние радиационных дефектов на излучательные свойства кремния и гетероструктур SiGe/Si(001) увеличивается с ростом температуры измерения спектров ФЛ. Так, при комнатной температуре интенсивность сигнала межзонной ФЛ объемного Si в структуре с $\text{Si}_{0.93}\text{Ge}_{0.07}$ -КЯ значительно падает уже после воздействия электронами с малой дозой и практически пропадает в результате облучения электронами с большей дозой. В то же время сигнал ФЛ от островков в многослойной структуре при комнатной температуре сохраняется после всех используемых видов радиационного воздействия (рис. 5), что говорит о более высокой радиационной стойкости светоизлучающих свойств SiGe-наноструктур. Сравнение спектров ФЛ многослойной структуры с Ge(Si)-наноостровками, измеренных при 77 и 300 К (рис. 4 и 5), показывает, что, как и в случае объемного Si, влияние радиационного воздействия на падение интенсивности сигнала ФЛ от островков возрастает с ростом температуры измерения.

Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали более высокую радиационную стойкость светоизлучающих свойств SiGe-наноструктур по сравнению с объемным Si. При этом влияние высокоэнергетичного облучения на спектры ФЛ SiGe-наноструктур ослабевает по мере увеличения эффективности пространственной локализации носителей заряда в них. Обнаруженная наибольшая, из исследованных структур, радиационная стойкость сигнала ФЛ от самоформирующихся Ge(Si)-наноостровков в многослойных структурах связывается с эффективной пространственной локализацией носителей заряда в них (трехмерной для дырок в островках и двумерной для электронов в Si-слоях, разделяющих соседние слои с островками). Известно [12], что в кремнии длина диффузии фотовозбужденных носителей заряда (свободных или в составе экситона) может составлять от единиц до сотен микрон. Соответственно в процессе диффузии носители заряда могут встретить радиационные дефекты и рекомбинировать на них (излучательно или безызлучательно). В результате даже при небольшой концентрации радиационных дефектов в объемном Si вероятность рекомбинации носителей заряда на них может быть значительна. В низкоразмерных структурах длина диффузии носителей заряда за счет их пространственной локализации значительно меньше, чем в объемных материалах. В частности, при достаточно низких температурах дырки, попавшие в Ge-КЯ, не могут ее покинуть и имеют возможность свободно диффундировать только в слое Ge. В результате рекомбинировать они могут только на дефектах, созданных в самой КЯ. С увеличением температуры растет вероятность термоэмиссии дырок из КЯ и, следовательно, вероятность их безызлучательной рекомбинации на дефектах в Si.

В структурах с Ge(Si)-наноостровками движение дырок, локализованных в островках, ограничено во всех трех пространственных направлениях. Поэтому безызлучательная рекомбинация дырок, попавших в Ge(Si)-

островок, возможна только на дефектах, образованных в этом же островке. Образование точечного радиационного дефекта в отдельном Ge(Si)-наноструктуре приводит к тому, что этот островок перестает давать вклад в сигнал ФЛ, но носители заряда, локализованные в других островках, могут продолжать излучательно рекомбинировать. По мере увеличения дозы облучения происходит рост числа островков, в которых произошло образование радиационных дефектов, что ведет к уменьшению интенсивности сигнала ФЛ от островков. Но из-за высокой ($\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$) поверхностной плотности островков падение интенсивности сигнала ФЛ от них с ростом дозы происходит достаточно медленно.

Более высокая радиационная стойкость многослойной структуры с Ge(Si)-наноструктурами по сравнению с однослойной связывается с большей долей фотовозбужденных носителей заряда, попавших в островки в многослойной структуре. Дело в том, что глубина проникновения в кремний возбуждающего лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 532 \text{ нм}$ составляет $\sim 1.5 \text{ мкм}$, и в однослойной структуре, толщина которой 0.2 мкм , значительная часть излучения поглощается в Si-подложке. По мере роста концентрации радиационных дефектов в Si все меньшая часть носителей заряда, генерируемых в подложке, может достигнуть островков и в них рекомбинировать. Толщина же активной области многослойной диодной структуры с островками составляет $\sim 650 \text{ нм}$ [9]. Вклад в излучательную рекомбинацию могут вносить носители заряда, фотогенерируемые именно в этой области, так как большинство носителей заряда, фотогенерируемых в контактных слоях структуры и легированной подложке, безызлучательно рекомбинируют в результате оже-рекомбинации. В активной области многослойной структуры из-за высокой ($\sim 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) объемной плотности Ge(Si)-островков среднее расстояние между островками составляет $60\text{--}70 \text{ нм}$. Очевидно, что длина диффузии носителей заряда, фотогенерируемых в активной области структуры, до захвата их островками будет иметь тот же порядок величины. В результате длина диффузии фотогенерируемых носителей заряда в многослойной структуре значительно меньше, чем в структуре с одним слоем островков, что и обуславливает большую радиационную стойкость многослойной структуры с Ge(Si)-островками.

Приведенные выше качественные рассуждения о характере процессов рекомбинации в гетероструктурах с радиационными дефектами не учитывают особенностей формирования стабильных радиационных дефектов в гетероструктурах. Сделать это достаточно сложно, так как для рассматриваемых структур не имеется достаточно сведений о механизмах и параметрах диффузии радиационных дефектов при образовании стабильных комплексов, протекающей в течение нескольких недель между моментом облучения и измерениями спектров ФЛ. Проведенные исследования позволяют сделать некоторые заключения о местонахождении стабильных радиационных дефектов. Дело в том, что при электронном и

нейтронном воздействии первичные точечные дефекты являются достаточно подвижными, и за счет диффузии они могут перемещаться по полупроводниковой структуре, закрепляясь в тех областях гетеропереходов, где при этом будут сниматься механические напряжения структуры, т.е. вблизи гетерограниц, в SiGe-слоях и в наноструктурах. В связи с этим логично было бы предположить, что именно в этих областях будет накапливаться большее количество радиационных дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации. Однако, полученные экспериментальные результаты продемонстрировали обратное. В связи с этим можно сделать заключение, что скорость накопления радиационных дефектов на границах гетеропереходов, в GeSi-КЯ и наноструктурах мала.

4. Заключение

Проведенные экспериментальные исследования влияния различного радиационного воздействия на люминесцентные свойства низкоразмерных GeSi-гетероструктур показали их более высокую стойкость по сравнению с объемным кремнием. Увеличение радиационной стойкости связывается с пространственной локализацией носителей заряда в GeSi-наноструктурах, что препятствует их диффузии к радиационным дефектам и последующей безызлучательной рекомбинации на них. Показано, что наибольшей радиационной стойкостью обладают многослойные структуры с самоформирующимися Ge(Si)-наноструктурами, в которых реализована наиболее эффективная локализация носителей заряда: трехмерная для дырок в островках и двумерная для электронов в Si-слоях, разделяющих соседние слои с островками. Это указывает на предпочтения использования GeSi-гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами при создании радиационно стойкой элементной базы кремниевой оптоэлектроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-02-97043-р_поволжье_a), Рособразования (проект 2.1.1/617) и программ РАН.

Список литературы

- [1] M.R. Leon, G.M. Swift, B. Magness, W.A. Taylor, Y.S. Tang, K.L. Wang. Appl. Phys. Lett., **76**, 2074 (2000).
- [2] M.B. Huang, J. Zhu, S. Oktyabrsky. Nucl. Instrum. Meth B, **211**, 505 (2003).
- [3] A. Fonseca, N.A. Sobolev, J.P. Leitão, E. Alves, M.C. Carmo, N.D. Zakharov, P. Werner, A.A. Tonkikh, G.E. Cirlin. J. Luminesc., **121**, 417 (2006).
- [4] J.P. Leitão, N.M. Santos, N.A. Sobolev, M.R. Correia, N.P. Stepina, M.C. Carmona, S. Magalhães, E. Alves, A.V. Novikov, M.V. Shaleev, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik. Mater. Sci. Eng. B, **147**, 191 (2008).
- [5] D.J. Paul. Semicond. Sci. Technol., **19**, R75 (2004).
- [6] R. Apetz, L. Vescan, A. Hartmann, C. Dieker, H. Lüth. Appl. Phys. Lett., **66**, 445 (1995).

- [7] А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, А.И. Никифоров, С.В. Чайковский, С.А. Тийс. ФТП, **37**, 1383 (2003).
- [8] Н.В. Востоков, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, А.Н. Яблонский. ФТТ, **46**, 63 (2004).
- [9] Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, К.Е. Кудрявцев, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Д.В. Шенгуров, В.Б. Шагин, А.Н. Яблонский. ФТП, **42**, 291 (2008).
- [10] В.С. Багаев, В.В. Зайцев, В.С. Кривобок, Д.Н. Лобанов, С.Н. Николаев, А.В. Новиков, Е.Е. Онищенко. ЖЭТФ, **134**, 988 (2008).
- [11] O.G. Schmidt, K. Eberl, Y. Rau. Phys. Rev. B, **62**, 16 715 (2000).
- [12] G. Davies. Phys. Reports, **176**, 83 (1989).
- [13] В.Я. Алешкин, Н.А. Бекин, Н.Г. Калугин, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, В.В. Постников, Х. Сейрингер. Письма ЖЭТФ, **67**, 46 (1998).
- [14] S. Fukatsu, H. Sunamura, Y. Shiraki, S. Komiyama. Thin Sol. Films, **321**, 65 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

Effect of irradiation on luminescence properties of low-dimensional SiGe/Si(001) heterostructures

A.V. Novikov, A.N. Yablonskiy, V.V. Platonov, S.V. Obolenskiy⁺, D.N. Lobanov, Z.F. Krasilnik*

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia
* Sarov Physicotechnical Institute,
607183 Sarov, Russia
⁺ Nizhny Novgorod State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The influence of radiation of luminescence properties of low-dimensional SiGe heterostructures with different degree of space localization of charge carriers has been studied. It has been observed that radiation hardness of SiGe heterostructures rises with an increase of the charge carrier's localization efficiency. Space localization of charge carriers in SiGe nanostructures reduces the probability of their nonradiative recombination on radiation defects produced in Si matrix. It has been shown that the multilayer structure with SiGe self-assembled islands has the highest radiation resistance among the investigated structures, which is explained by the most effective localization of charge carriers in this structure: threedimensional localization of holes in Ge(Si) island and twodimensional localization of electrons in the Si spacer layers between the island's layers.