

А. В. Войцеховский¹, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., e-mail: vav@elefot.tsu.ru,

Н. А. Кульчицкий², д-р техн. наук, проф., e-mail: n.kulchitsky@gmail.com,

А. А. Мельников², д-р техн. наук, проф., **С. Н. Несмелов**¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

А. П. Коханенко¹, д-р физ.-мат. наук, проф., **К. А. Лозовой**¹, аспирант, **В. Г. Сатдаров**¹, студент

¹ Томский государственный университет (г. Томск), e-mail vav43@mail.tsu.ru,

² Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет, г. Москва), e-mail n.kulchitsky@gmail.com

ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР Si/Ge С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ Ge

Поступила в редакцию 25.11.2014

Представлен анализ научно-технической литературы по оптическим и фотоэлектрическим свойствам наногетероструктур Ge/Si. Описаны особенности полупроводниковых структур с наноразмерными включениями, их оптические и фотоэлектрические свойства. Проведен обзор электронной структуры и оптических свойств материалов на основе Si/Ge с квантовыми точками Ge. Проведено сравнение спектров фотолюминесценции, электролюминесценции структур данного типа, спектров фотопроводимости, рассмотрено явление отрицательной фотопроводимости.

Ключевые слова: наногетероструктуры, квантовые точки, кремний, германий, солнечные элементы, фотопреобразователи, фотоэлектрические характеристики

Введение

Изучение оптических и фотоэлектрических свойств полупроводниковых структур на основе кремния с квантовыми точками германия является актуальной задачей в связи с необходимостью получения подобных структур с уникальными физическими свойствами для перспективных приборов оптоэлектроники. Интерес к подобным структурам и их свойствам связан с перспективностью гетероструктур Ge/Si для создания солнечных элементов и фотодетекторов, в том числе для ближнего инфракрасного диапазона (1,3...1,55 мкм) [1–6].

Фотоэлектрические характеристики гетероструктур с квантовыми точками германия на кремнии могут исследоваться измерением спектра фото- и электролюминесценции, определением спектра фотопроводимости.

В обзоре рассмотрены особенности полупроводниковых структур с квантовыми точками Ge в Si, их оптические и фотоэлектрические свойства, методики их измерения.

Фотолюминесценция структур Ge/Si

Один из наиболее важных методов исследования оптических и фотоэлектрических свойств полупроводниковых материалов с наноразмерными включениями — измерение спектра фотолюминесценции, так как оно дает наиболее полную картину об энергетической структуре материала.

Детально исследованы излучательные свойства структур квантовых точек Ge в матрице Si, выра-

щенных в режиме Странского—Крастанова. Оказалось, что они зависят от температуры роста. Так, при сравнительно низких температурах (около 400 °С) создаются структуры, способные излучать фотоны с энергией, даже меньшей, чем ширина запрещенной зоны германия, а именно в диапазоне приблизительно от 0,6 до 0,9 эВ [1, 7, 8]. Такая возможность обусловлена тем, что точки Ge в Si образуют полупроводниковую гетероструктуру 2-го типа, в которой в излучательную рекомбинацию вовлекаются дырки, захваченные в потенциальные ямы квантовых точек Ge, и электроны из окружающего Si, локализованные на границе с точками германия. Излучательные свойства структур квантовых точек зависят от температуры роста и других параметров, таких как скорость осаждения Ge, толщина напыляемых слоев [4, 9–11], уровень легирования [12].

Структуры, выращенные при более высоких температурах (около 600 °С), излучают фотоны в более узком диапазоне энергий вблизи 0,8 эВ независимо от размера квантовых точек Ge, от толщины слоев Si, разделяющих слои точек германия. Это может быть связано с тем, что эффект пространственного квантования в точках Ge, выращенных в режиме Странского—Крастанова, может быть незначительным из-за их большого размера. Интерес к структурам, излучающим фотоны с энергией около 0,8 эВ, вызван использованием этой области спектра в оптоволоконных средствах связи [1]. На рис. 1 изображены примеры измерений спектров фотолюминесценции наногетероструктур Ge/Si.

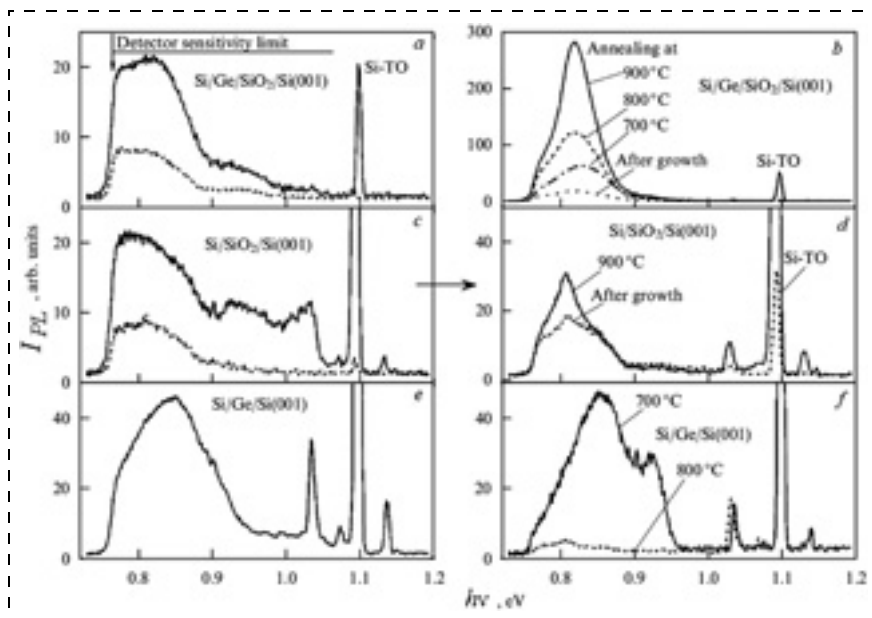


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции наноструктур, выращенных (a—d) на окисленной поверхности кремния в результате осаждения (a, b) слоя островков германия, покрытых слоем кремния, и (c, d) только слоя кремния, а также (e, f) в режиме Странского—Крастанова [1]; I_{PL} — интенсивность фотолуминесценции

Fig. 1. Photoluminescence spectra of the nanostructures grown (a—d) on an oxidized surface of silicon during sedimentation (a, b) of a layer of islets of Ge, covered with a silicon layer, (c, d) only a silicon layer, (e, f) in Stranski-Krastanov mode [1]; I_{PL} — intensity of photoluminescence

Структуры Ge/Si, выращенные на окисленной поверхности кремния, излучают в области 0,8 эВ с интенсивностью, возрастающей на 1–2 порядка при увеличении температуры отжига до 1000 °C (рис. 1, b). Структуры Ge/Si, выращенные в режиме Странского—Крастанова и отожженные при температурах выше 700 °C, практически полностью теряют способность к фотолуминесценции, связанной с квантовыми точками германия (рис. 1, f) [1]. Такая зависимость фотолуминесценции от температуры отжига часто используется как критерий для подтверждения происхождения фотолуминесценции от квантовых точек германия, а не от кристаллических дефектов в окружающем кремнии. Таким образом, возрастание интенсивности фотолуминесценции на 1–2 порядка в области 0,8 эВ в структурах Ge/Si, выращенных на окисленной поверхности кремния и отожженных при температуре выше 700 °C, не может быть связано с квантовыми точками Ge, а происходит вследствие оптической рекомбинации в закрывающем слое кремния.

Таким образом, спектры фотолуминесценции на рис. 1, b показывают, что слои кремния, выращенные на слое островков германия на окисленной поверхности кремния, способны излучать свет только при энергиях в области 0,8 эВ, т. е. имеют эффективную ширину запрещенной зоны, значительно меньшую, чем кристаллический кремний. Это свидетельствует о существенном отличии атомной структуры этих слоев, которые могут быть

названы слоями наноструктурированного кремния (нс-Si), от структуры кристаллического Si [1].

В работе [7] исследовано влияние температуры роста на фотолуминесценцию структур с островками Ge(Si), выращенными на релаксированных буферных слоях SiGe/Si(001) и заключенных между напряженными Si-слоями. Показано, что при уменьшении температуры роста в интервале 700...630 °C пик фотолуминесценции (ФЛ) островков смещается в область меньших энергий, что обусловлено увеличением содержания Ge в островках и подавлением размытия напряженных Si-слоев. Обнаружено смещение пика в область больших энергий при понижении температуры роста с 630 до 600 °C (рис. 2). Это связано с изменением типа островков с *dome* на *hut*.

Для повышения локализации электронов в работе [11] было предложено использовать Ge(Si)-

структуры с самоформирующимися островками, выращенными на релаксированном $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ буферном слое и встроенными в напряженный Si-слой (e-Si-слой). При этом он является эффективной потенциальной ямой для электронов (рис. 3).

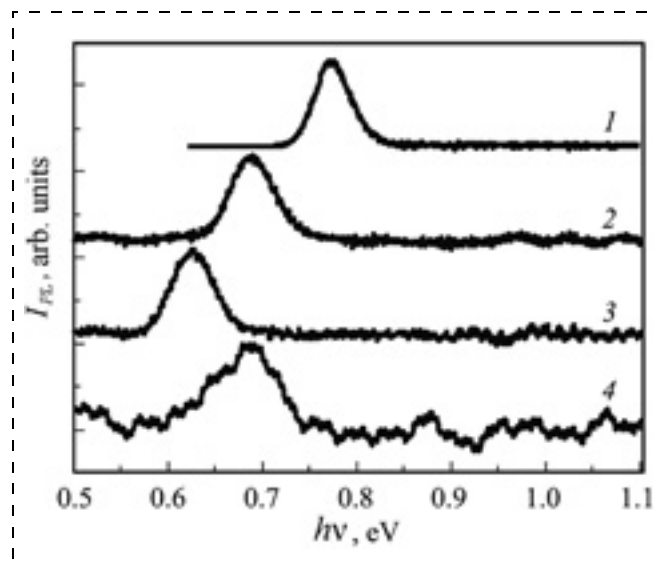


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции структур с островками Ge(Si)/Si, сформированными при температурах 700 (1), 600 (2), 630 (3) и 600 °C (4). Температура измерений 77 K [7]

Fig. 2. Photoluminescence spectra of the structures with islets of Ge(Si)/Si, formed at 700 (1), 600 (2), 630 (3) and 600 °C (4). Temperature of measurements — 77 K [7]

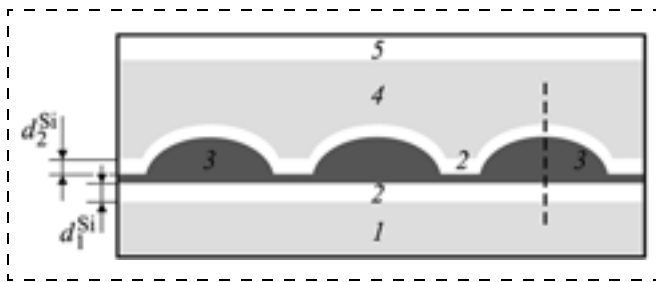


Рис. 3. Схематическое изображение поперечного сечения гетероструктур с Ge(Si)-самоформирующимися островками, заключенными между e-Si-слоями [11]: 1 — SiGe-буферный слой, 2 — Si-слои под и над островками, 3 — Ge(Si)-самоформирующиеся островки, 4 — покровный SiGe-слой, 5 — защитный слой Si

Fig. 3. Image of a cross-section of the heterostructures with Ge(Si) self-forming islets between the e-Si layers [11]: 1 — SiGe — buffer layer, 2 — Si layers above and under the islets, 3 — Ge(Si) self-forming islets, 4 — covering SiGe layer, 5 — protecting Si layer

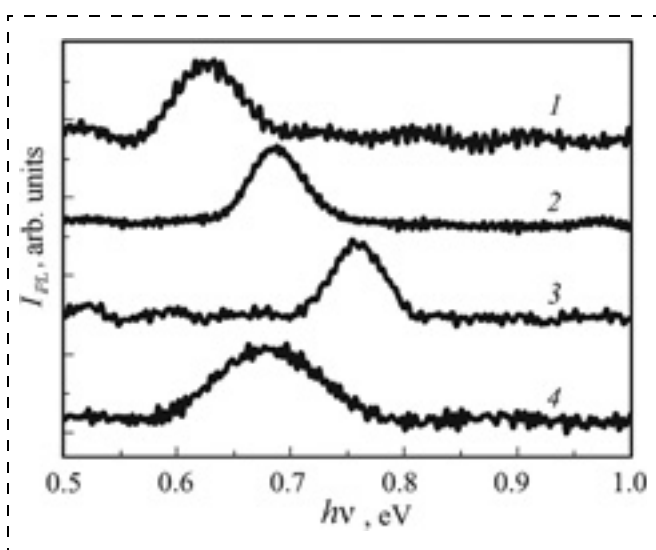


Рис. 4. Спектры ФЛ структур с Ge(Si)/e-Si-островками ($T = 77$ K) [11]

Fig. 4. PL spectra of the structures with c Ge(Si)/e-Si islets at 77 K [11]

Положение энергетических уровней электронов в такой яме можно контролировать, меняя состав буферного SiGe-слоя и толщину e-Si-слоя. Показана возможность эффективного управления положением пика ФЛ от островков за счет изменения толщин e-Si-слоев над и под островками.

Из рис. 4 видно, что при уменьшении толщин e-Si-слоев над (d_1^{Si}) и под (d_2^{Si}) островками от 3 нм до 1 нм положение пика фотолуминесценции от Ge(Si)/e-Si-островков смещается в область больших энергий. Обнаруженное смещение связано с тем, что при уменьшении толщин e-Si-слоев в результате квантово-размерных эффектов происходит выталкивание первого энергетического уровня электронов в e-Si-слоях ко дну зоны проводимости.

Также в работе [11] продемонстрировано увеличение на порядок интенсивности сигнала фотолу-

минесценции при 77 K от Ge(Si)-островков, встроенных в напряженный e-Si-слой, по сравнению с сигналом ФЛ от Ge(Si)-островков, выращенных на ненапряженных Si(001)-подложках. Увеличение интенсивности фотолуминесценции связывается с эффективной локализацией электронов в потенциальных ямах, образованных e-Si-слоями над и под островками.

Фотопроводимость структур Si/Ge

Изучение латеральной фотопроводимости в Si/Ge-структурах, содержащих самоорганизующиеся квантовые точки Ge, актуально в связи с возможностью использования этих структур в оптоэлектронных приборах [12].

На рис. 5 приведена спектральная зависимость продольной фотопроводимости структуры Ge/Si с квантовыми точками Ge (кривая 1) при комнатной температуре. Для сравнения также проведены измерения спектральной зависимости продольной фотопроводимости структур с неоднородными двумерными (2D) слоями Ge (кривая 2) и образца монокристаллического Si (c-Si), который не содержал Ge (кривая 3). Положение длинноволнового края измеренных спектров указывает на то, что фототок обусловлен генерацией неравновесных носителей заряда за счет не прямых зона-зонных переходов в Si.

Структура с квантовыми точками Ge обнаружила значительно большую фоточувствительность в области энергий квантов $1,0 < h\nu < 1,11$ эВ, мень-

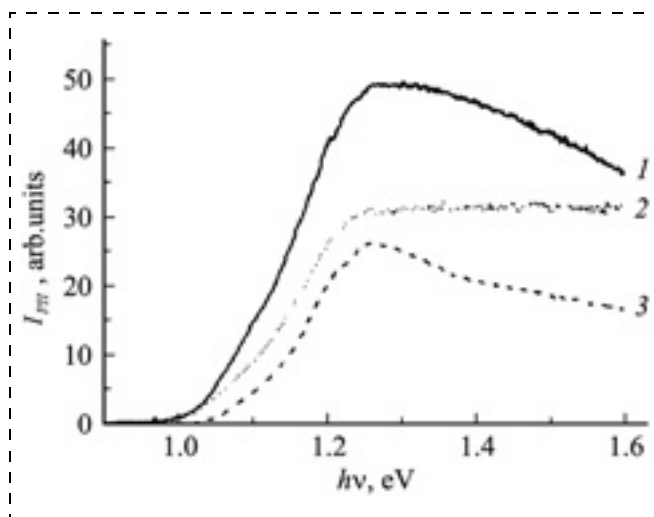


Рис. 5. Спектральные зависимости продольной фотопроводимости гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками Ge (кривая 1), структуры с двумерными слоями Ge (кривая 2) и образца c-Si (кривая 3) при 290 K [3]; I_{PH} — фототок

Fig. 5. Spectral dependences of the longitudinal photoconductivity of Ge/Si heterostructure with Ge quantum dots (curve 1), structures with two-dimensional Ge layers (curve 2), and c-Si sample (curve 3) at 290 K [3]; I_{PH} — photocurrent

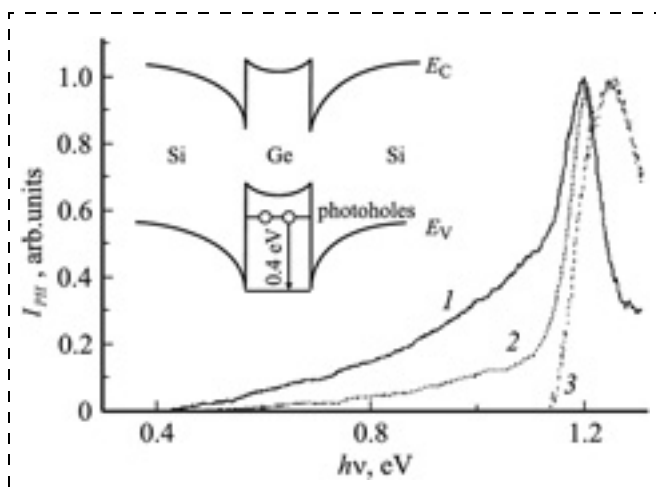


Рис. 6. Спектральные зависимости продольной фотопроводимости гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками Ge (кривая 1), структуры с неоднородными 2D слоями Ge (кривая 2) и c-Si образца (кривая 3) при $T = 77$ К. На вставке — зонная диаграмма гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками [3]

Fig. 6. Spectral dependences of the longitudinal photoconductivity of Ge/Si heterostructure with Ge quantum dots (curve 1), structure with nonuniform 2D Ge layers (curve 2) and c-Si sample (curve 3) at 77 K. On the insert is a band diagram of Ge/Si heterostructure with quantum dots [3]

ших ширины запрещенной зоны c-Si при комнатной температуре ($E_g = 1,11$ эВ). Как известно, форма спектра вблизи длинноволнового края фотопроводимости определяется спектральной зависимостью спектра оптического поглощения. Таким образом, отличие спектров фотопроводимости обусловлено изменениями в оптическом поглощении гетероструктур с квантовыми точками [3].

В свою очередь, эффекты размерного квантования в структурах с квантовыми точками определяются размерами нанокластеров и, возможно, упругими напряжениями в системе.

Заметно больший фотоотклик структуры с квантовыми точками в инфракрасной области $1,0...1,11$ эВ можно объяснить тем, что сжатые области Si вблизи nanoостровка имеют меньшую ширину запрещенной зоны по сравнению с недеформированной Si-матрицей. Неравновесные носители заряда, генерируемые в сжатых областях Si, дают вклад в фототок в области $1,0...1,11$ эВ.

Зона-зонные переходы в кремниевых структурах с квантовыми точками Ge изучались в [12] методом спектроскопии фототока при поперечном направлении приложенного напряжения смещения. Фоточувствительность ~ 10 мА/Вт в области $900...1200$ мэВ объяснялась непрямыми экситонными переходами между дырочными состояниями в Ge и локализованными в Si электронными состояниями.

Можно предположить, что в структурах с квантовыми точками Ge поглощение в области

$900...1200$ мэВ обусловлено как непрямыми переходами, так и переходами в деформированных эпитаксиальных слоях Si вблизи нанокластеров. Относительный вклад каждого механизма поглощения, вероятно, зависит от плотности квантовых точек, их размера и однородности распределения, что требует дополнительного исследования [3].

При уменьшении температуры до $T < 120$ К в гетероструктурах с квантовыми точками обнаружена фоточувствительность $0,4...1,15$ эВ в инфракрасной области, где c-Si является прозрачным. На рис. 6 приведены спектральные зависимости продольной фотопроводимости структуры с квантовыми точками (кривая 1), структуры с неоднородными 2D слоями Ge (кривая 2) и образца c-Si без Ge (кривая 3), измеренные при 77 К.

Для объяснения непрерывного возрастания фотоотклика при увеличении $h\nu$ в спектральной области $0,4...1,15$ эВ гетероструктуры с квантовыми точками следует рассмотреть зонную диаграмму Ge/Si. Общепринято относить эти структуры к типу II, в которых потенциальная яма существует только для носителей заряда одного знака. Энергия ионизации основного состояния дырок в квантовой точке по отношению к валентной зоне Si составляет примерно 400 мэВ [3]. На вставке к рис. 6 приведена зонная диаграмма структуры вдоль планарного направления, проходящего через нанокластер Ge. Изображенные изгибы зон вблизи гетерограницы обусловлены неоднородной деформацией. В результате вблизи гетерограниц Ge/Si в кремнии возникают потенциальные ямы для электронов.

Исследованы спектры продольной фотопроводимости многослойных структур Si/Ge с квантовыми точками Ge [16, 17]. Наблюдались линии оптических переходов между дырочными уровнями квантовых точек и электронными состояниями Si. На рис. 7 показаны спектры фотопроводимости двух образцов, измеренные при 78 К в диапазоне $0,3...1,2$ эВ. Установлена возможность управления спектром электронно-дырочных состояний массива квантовых точек Ge с помощью изменения параметров роста структуры Si/Ge [16].

Значение ширины запрещенной зоны Si ($E_g = 1,12$ эВ) показано на рис. 7 вертикальной штриховой линией. Образец 1 с массивом квантовых точек Ge обнаруживает широкий пик фотоотклика в диапазоне $0,6...0,9$ эВ. Видно, что его форма является результатом наложения линий трех дублетов, которые проявляются в виде слабых особенностей, отмеченных на кривой 1 (см. рис. 7) малыми стрелками. Дублетное расщепление составляет 30 мэВ, а расстояние между дублетами равно 80 мэВ. Структура спектра фотопроводимости хорошо воспроизводится для образцов с меньшим содержанием псевдоморфных квантовых точек Ge

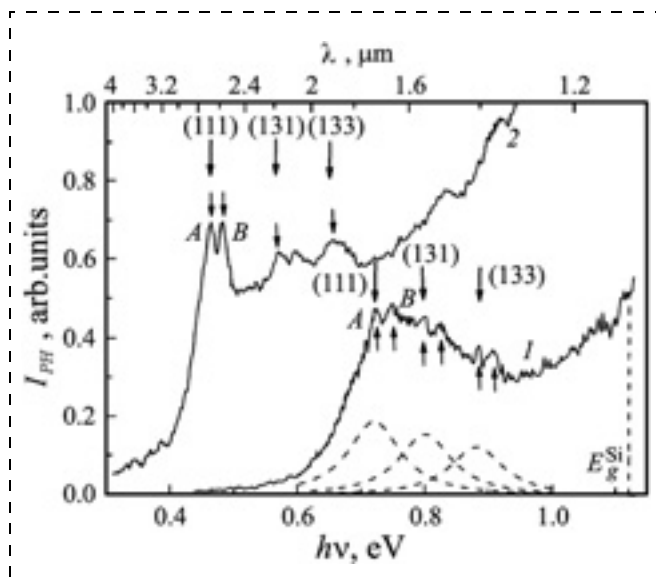


Рис. 7. Спектры фотопроводимости двух образцов многослойных структур Si/Ge с квантовыми точками Ge при 78 К: 1, 2 — образцы, полученные при разных условиях роста [17]

Fig. 7. Photoconductivity spectra of two samples of Si/Ge multilayered structures with Ge quantum dots at 78 K: 1, 2 — samples received under different conditions of growth [17]

в массивах (~50 %). В этих случаях основной широкий пик уже размыт в непрерывно спадающее крыло из-за неоднородной релаксации напряжений. Таким образом, наличие малых пиков (см. рис. 7, кривая 1, малые стрелки) показывает, что достаточно большое число псевдоморфных квантовых точек Ge содержится в исследуемом массиве [17].

Образец 2, спектр фотопроводимости которого также приведен на рис. 7 (кривая 2), получен при более высокой температуре роста слоев Si ($T_s \approx 500^\circ\text{C}$), чем образец 1 ($T_s \approx 450^\circ\text{C}$). В этом случае значение напряжения в квантовых точках уменьшается на 20 %, а их размеры увеличиваются в результате взаимного перемешивания компонентов при росте. Дублетная структура (см. рис. 7, кривая 2, линии А и В) связана с электронными уровнями Si, образованными в деформационной потенциальной яме вблизи гетерограниц Si/Ge. Пики спектра фотопроводимости, отмеченные на кривой 2 стрелками, обусловлены оптическими переходами между дырочными уровнями квантовых точек и состояниями зоны проводимости Si [17].

В работах [18, 19] экспериментально обнаружено явление отрицательной фотопроводимости в квантовых точках Ge/Si, заключающееся в уменьшении проводимости слоя с квантовыми точками при освещении.

Механизм явления отрицательной фотопроводимости заключается в следующем. Рассмотрим Si *n*-типа, в который встроены nanoостровки нелегированного Ge. В темноте проводимость системы

определяется свободными электронами в зоне проводимости Si, попавшими туда в результате термической ионизации доноров [18].

В отсутствие в квантовых точках дырок на гетерогранице Ge/Si существует мелкое состояние для электрона с энергией связи $E_t \approx 9$ мэВ вследствие неоднородных деформаций, приводящих к образованию потенциальной ямы для электрона. Поэтому равновесная концентрация электронов в зоне проводимости будет понижена за счет захвата электронов на этот уровень.

При поглощении света, вызывающего межзонные переходы и образование пар электронов и дырок, дырки начнут накапливаться в квантовых точках Ge, заряжая их положительно. В результате на гетерограницах Ge/Si в кремнии возникнут потенциальные ямы для электронов, в которых начнут накапливаться фотоэлектроны. С ростом числа дырок в островках (при увеличении интенсивности освещения) энергия залегания "избыточного" электронного уровня увеличивается. Поскольку по мере заглубления уровня степень его заполнения электронами растет, концентрация электронов в зоне проводимости должна уменьшиться, а проводимость системы снизиться.

Электролюминесценция структур Si/Ge

В работах [20, 21] исследовались фотоэлектрические свойства и электролюминесценция (ЭЛ) *p-i-n*-диодов на основе гетероструктур GeSi/Si с нанокластерами GeSi в *i*-области. Для измерения ЭЛ на поверхности образцов со стороны структуры формировался омический контакт Au/Ti диаметром 0,5 мм. Второй омический контакт формировался нанесением сплошной пленки Al на обратную сторону подложки. Структуры с контактами раскалывались на отдельные кусочки (чипы) размером 2×2 мм. Измерения спектров ЭЛ проводили на чипах в импульсном режиме, чтобы избежать перегрева образцов. Длительность импульсов составляла 4 мс, период повторения — 25 мс. Спектры ЭЛ регистрировали с помощью охлаждаемого жидким азотом Ge: Au-фотоприемника. Наблюдалась ЭЛ при различных температурах. Обнаружено, что структуры с островками, выращенными при 600°C , обладают наибольшей интенсивностью сигнала ЭЛ при комнатной температуре в области длин волн 1,3...1,55 мкм (рис. 8).

Отжиг структур с Ge(Si)-островками приводит к увеличению интенсивности сигнала ЭЛ при низких температурах, но ухудшает температурную стабильность этого сигнала (рис. 9), что связывается с дополнительной диффузией Si в островки во время отжига.

Обнаружен существенный рост интенсивности сигнала ЭЛ с увеличением толщины разделительного Si-слоя (рис. 10). Это связывается с уменьшением упругих напряжений в структуре с увеличением толщины этого слоя.

В результате проведенного сравнения спектров фотолюминесценции и электролюминесценции наногетероструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge, полученных различными способами, можно заключить, что квантовые точки Ge, внедренные в объемную матрицу Si, вызывают появление пика в области 0,7...0,9 эВ, что соответствует диапазону длин волн 1,3...1,55 мкм. При этом ширина и по-

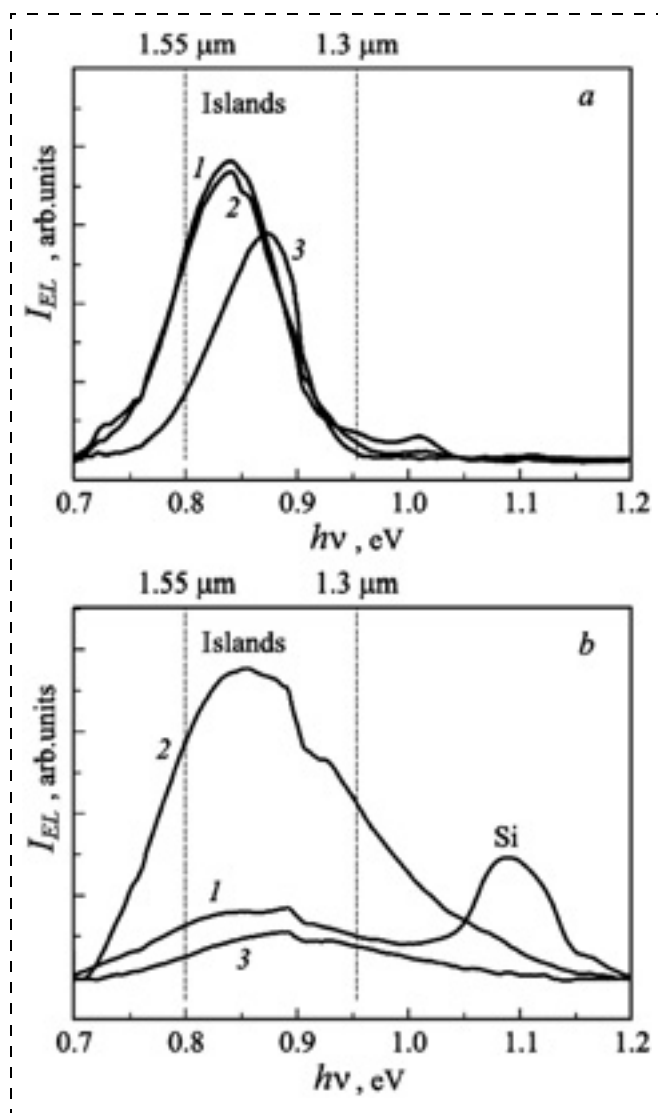


Рис. 8. Спектры электролюминесценции $p-i-n$ -диодных структур с Ge(Si)-островками, выращенных при 550 (1), 600 (2) и 650 °C (3). Спектры измерены при температурах 77 (а) и 300 К (б). Плотность тока накачки для всех структур — 5 А/см² [21]; I_{EL} — интенсивность электролюминесценции

Fig. 8. Electroluminescence spectra of $p-i-n$ -diode structures with Ge(Si) islets, grown at 550 (1), 600 (2) and 650 °C (3), and measured at 77 K (a) and 300 K (b). The density of the pump current for all the structures is 5 A/cm² [21]; I_{EL} is intensity of electroluminescence

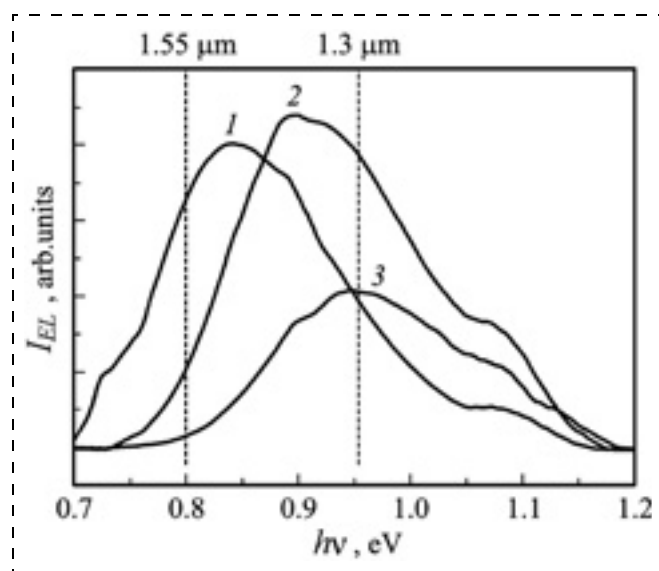


Рис. 9. Спектры электролюминесценции диодной структуры с Ge(Si)-островками, выращенной при 600 °C до отжига (1) и после отжига при 650 (2) и 700 °C (3). Спектры измерены при 300 К [21]

Fig. 9. Electroluminescence spectra of a diode structure with Ge(Si) islets, grown at 600 °C, before annealing (1) and after annealing at 650 (2) and 700 °C (3), and measured at 300 K [21]

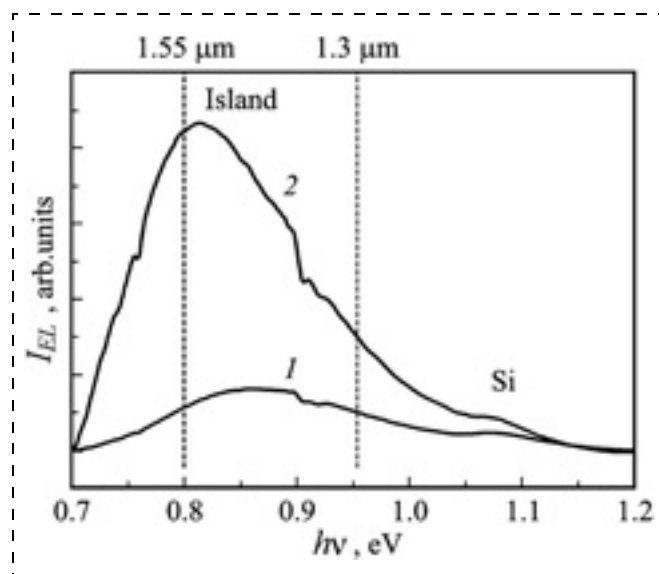


Рис. 10. Спектры электролюминесценции диодной структуры с Ge(Si)-островками, выращенной при 600 °C, с толщиной Si разделительного слоя 25 (1) и 32 нм (2). Спектры измерены при 300 К [21]

Fig. 10. Electroluminescence spectra of a diode structure with Ge(Si) islets, grown at 600 °C, with thickness of Si of the dividing layer of 25 (1) and 32 nm (2), and measured at 300 K [21]

ложение максимумов сигнала фотолюминесценции и электролюминесценции, связанного с квантовыми точками Ge, определяется разбросом параметров квантовых точек, их размерами, плотностью в массиве, а также диффузией Ge и Si.

В спектрах фотопроводимости структур Si/Ge, содержащих квантовые точки Ge, наблюдается

продление фотоотклика в ИК область до значений энергии фотонов 0,4...0,9 эВ. Отличие спектров фотопроводимости обусловлено изменениями в оптическом поглощении гетероструктур с квантовыми точками. В свою очередь, эффекты размерного квантования в структурах с квантовыми точками определяются размерами нанокластеров и, возможно, упругими напряжениями в системе.

Заключение

Проведен обзор электронной структуры и оптических свойств материалов на основе Si/Ge с квантовыми точками, обзор литературы последних лет, посвященной исследованию фотоэлектрических свойств наногетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge.

Высокая эффективность поглощения излучения, поляризованного в плоскости выращивания, которая наблюдается по данным спектроскопии фотопроводимости для структур *p*-Si/Ge свидетельствует о перспективности их применения в детекторах для среднего ИК диапазона, а также в матрицах, требующих нормального падения излучения и высокой однородности пикселей.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта *p_Сибирь_а* № 13-02-98023.*

Список литературы

1. Шкляев А. А., Ичикава М. Предельно плотные массивы наноструктур германия и кремния // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 2. С. 139—169.
2. Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Несмелов С. Н., Коханенко А. П., Лозовой К. А. Технология создания структур с квантовыми точками молекулярно-лучевой эпитаксией Ge/Si // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9. С. 20—30.
3. Кондратенко С. В., Николенко А. С., Вакуленко О. В., Головинский С. Л., Козырев Ю. Н., Рубежанская М. Ю., Водяницкий А. И. Продольная фотопроводимость гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge // ФТП. 2007. Т. 41, № 8. С. 955—958.
4. Егоров В. А., Цырлин Г. Э., Тонких А. А., Талалаев В. Г., Макаров А. Г., Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Zakharov N. D., Wernert P. Si/Ge наноструктуры для применений в оптоэлектронике // ФТТ. 2004. Т. 46, № 1. С. 53—59.
5. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Лозовой К. А., Турапин А. М., Романов И. С. Фоточувствительные структуры на основе наногетероструктур Si/Ge для оптических систем передачи информации // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1, № 3. С. 338—343.
6. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Двуреченский А. В., Соколов Л. В., Никифоров А. И., Якимов А. И., Фойхтлендер Б. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства // ФТП. 2000. Т. 34, № 11. С. 1281—1299.
7. Шалеев М. В., Новиков А. В., Яблонский А. Н., Кузнецов О. А., Дроздов Ю. Н., Лобанов Д. Н., Красильник З. Ф.

Влияние температуры роста на фотолюминесценцию самоформирующихся островков Ge(Si), заключенных между напряженными слоями Si // ФТП. 2007. Т. 71, № 11. С. 1375—1380.

8. Li H., He T., Dai L., Wang X., Wang W., Chen H. Temperature dependence of photoluminescence from self-organized Ge quantum dots with large size and low density // Science China. Physics, Mechanics and Astronomy. 2011. V. 54, N 2. P. 245—248.

9. Востоков Н. В., Красильник З. Ф., Лобанов Д. Н., Новиков А. В., Шалеев М. В., Яблонский А. Н. Влияние скорости осаждения Ge на рост и фотолюминесценцию самоформирующихся островков Ge(Si)/Si(0001) // ФТТ. 2005. Т. 47, № 1. С. 41—43.

10. Шамирзаев Т. С., Сексенбаев М. С., Журавлев К. С., Никифоров А. И., Ульянов В. В., Пчеляков О. П. Фотолюминесценция квантовых точек германия, выращенных в кремнии на субмонослое SiO₂ // ФТТ. 2005. Т. 47, № 1. С. 80—82.

11. Шалеев М. В., Новиков А. В., Яблонский А. Н., Кузнецов О. А., Дроздов Ю. Н., Красильник З. Ф. Влияние напряженного Si-слоя на фотолюминесценцию Ge(Si) самоформирующихся островков, выращенных на релаксированных SiGe/Si-буферных слоях // ФТП. 2007. Т. 42, № 2. С. 172—176.

12. Шегай О. А., Марков В. А., Никифоров А. И. Индуцированная межзонным светом ступенчатая фотопроводимость структур Si/Ge с квантовыми точками // ФТТ. 2004. Т. 46, № 1. С. 77—79.

13. Brunner K. Si/Ge nanostructures // Rep. Prog. Phys. 2002. V. 65, N. 21. P. 27—72.

14. Wang K. L., Tong S., Kim H. J. Properties and application of SiGe nanodots // Material Science in Semiconductor Processing. 2005. V. 8. P. 389—399.

15. Boucaud P., Sauvage S., Elkurdi M., Mercier E., Brunhes T., Thanh V. Le, Bouchier D. Optical recombination from excited states in Ge/Si self-assembled quantum dots // Physical review B. 2001. V. 64. P. 155310 (1—6).

16. Талочкин А. Б., Чистохин И. Б., Марков В. А. Продольная фотопроводимость многослойных Ge/Si-структур с квантовыми точками Ge // ФТП. 2009. Т. 43, № 8. С. 1034—1038.

17. Талочкин А. Б., Чистохин И. Б. Фотопроводимость многослойных структур Si/Ge с квантовыми точками Ge, псевдоморфными к Si-матрице // ФТП. 2011. Т. 45, № 7. С. 936—940.

18. Двуреченский А. В., Якимов А. И. Квантовые точки 2 типа в системе Ge/Si // ФТП. 2001. Т. 35, № 9. С. 1143—1153.

19. Антонов А. В., Алешкин В. Я., Гавриленко В. И., Красильник З. Ф., Новиков А. В., Шалеев М. В. Отрицательная фотопроводимость в среднем ИК-диапазоне селективно легированных гетероструктур SiGe/Si:B с двумерным дырочным газом // ФТТ. 2005. Т. 47, № 1. С. 47—49.

20. Максимов Г. А., Красильник З. Ф., Филатов Д. О., Круглова М. В., Морозов С. В., Ремизов Д. Ю., Николичев Д. Е., Шенгуров В. Г. Фотоэлектрические свойства и электролюминесценция *p-i-n*-диодов на основе гетероструктур с самоорганизованными нанокластерами GeSi/Si // ФТТ. 2005. Т. 47, № 1. С. 26—28.

21. Лобанов Д. Н., Новиков А. В., Кудрявцев К. Е., Шенгуров Д. В., Дроздов Ю. Н., Яблонский А. Н., Шмагин В. Б., Красильник З. Ф., Захаров Н. Д., Werner P. Влияние параметров Ge(Si)/Si(001) самоформирующихся островков на их электролюминесценцию при комнатной температуре // ФТП. 2009. Т. 43, № 3. С. 332—336.

Optical and Photoelectrical Properties of Ge/Si Nanoheterostructures with Ge Quantum Dots

Study of optical and photoelectrical properties of semiconductor structures based on silicon with germanium quantum dots is an important task for researchers today because there is a demand for creation of structures with unique physical properties for fabricating new promising optoelectronic devices. In this paper analysis of scientific and technical literature on optical and photoelectrical properties of germanium on silicon nanoheterostructures is given. Peculiarities of semiconductor structures with nanodimensional inclusions, such as quantum dots, their optical and photoelectrical properties are described. A review on electronic structure and optical properties of germanium on silicon nanoheterostructures with quantum dots is conducted. Methods of measurement of optical and photoelectrical properties of such structures are described. Photoelectrical characteristics of heterostructures with quantum dots of germanium on silicon may be characterized by traditional methods of measuring photoluminescence and electroluminescence spectra and defining photoconductivity spectrum. These important methods of investigations of semiconductor materials give full information about energy structure of material. A comparison of photoluminescence, electroluminescence and photoconductivity spectra of such structures is done. An attention is given to the phenomenon of negative photoconductivity. The results of conducted review show that absorption of radiation polarized in the plane of growth has high efficiency. This fact was observed from the data of photoconductivity spectroscopy for p-Si/Ge structures. It argues for good perspectives of using of such structures in photodetectors of mid-infrared range and their matrices that require normal incidence light and high homogeneity of pixels.

Keywords: nanoheterostructures, quantum dots, silicon, germanium, solar cells, photodetectors, photoelectrical properties

Introduction

Studying of the optical and photo-electric properties of the semi-conductor structures on the basis of silicon with quantum dots of germanium is an important task because of necessity to obtain structures with unique physical properties for perspective devices of optoelectronics. The interest to such structures and their properties is due to the prospects of Ge/Si heterostructures for the solar elements and photodetectors, including for a near IR range (1,3...1,55 μm) [1–6].

The photo-electric characterises of the heterostructures with quantum dots of germanium on silicon can be investigated by measurement of the spectrum of photo- and electroluminescence, and determination of the spectrum of photoconductivity.

The review is devoted to the specific features of the semi-conductor structures with quantum dots of Ge in Si, their optical and photo-electric properties, and techniques for their measurement.

Photoluminescence of Ge/Si structures

One of the most important methods for research of the optical and photo-electric properties of the semi-conductor materials with nano-sized inclusions is measurement of their photoluminescence spectrum, because it gives the fullest picture of the energy structure of a material.

The radiating properties of the structures of Ge quantum dots in a Si matrix, grown in a Stranski-Krastanov mode have been thoroughly investigated. It turned out that they depend on the growth temperature. So, at rather low temperatures (about 400 °C) the structures are formed, capable to radiate photons with energy even smaller, than the width of the forbidden Ge zone, namely, in the range from about 0,6 up to 0,9 eV [1, 7, 8]. This is possible, because

Ge dots in Si form a semiconductor heterostructure of the second type, in which the radiating recombination includes the holes, trapped into the potential pits of Ge quantum dots and the electrons from the surrounding Si, localized on the border with the dots of germanium. The radiating properties of the structures of the quantum dots depend on the temperature of growth and other parameters: speed of sedimentation of Ge, thickness of the deposited layers [4, 9–11], and the level of doping [12].

The structures which were grown at higher temperatures (about 600 °C), radiate photons in a narrower range of energies, close to 0,8 eV, irrespective of the size of the Ge dots and thickness of the Si layers dividing the layers of Ge dots. This may be connected with the fact that the effect of the spatial quantization in Ge dots grown in Stranski-Krastanov mode can be insignificant because of their big size. The interest to the structures radiating photons with energy of about 0,8 eV is due to the use of this spectrum range in the fiber-optical communication facilities [1]. Fig. 1 presents examples of measurements of the photoluminescence spectra of the Ge/Si nanoheterostructures.

The Ge/Si structures grown on the oxidized surface of silicon radiate in the range of 0,8 eV with the intensity increasing by 1–2 orders in case of an increase of the annealing temperature up to 1000 °C (fig. 1, b). The Ge/Si structures grown in Stranski-Krastanov mode and annealed at over 700 °C lose practically completely their photoluminescence ability connected with Ge quantum dots (fig. 1, e) [1]. Such a dependence is often used as a criterion for acknowledgement that the origin of a photoluminescence is Ge quantum dots, but not crystal defects in the surrounding silicon. Thus, an increase in the photoluminescence intensity by 1 or 2 orders in the range of 0,8 eV

in Ge/Si structures grown on an oxidized surface of silicon and annealed at temperature over 700 °C, cannot be due to Ge quantum dots, but it occurs due to an optical recombination in the covering layer of silicon.

Thus, the photoluminescence spectra presented in fig. 1, *b* show that the layers of the silicon, which were grown on a layer of Ge islets on an oxidized surface of silicon, can radiate light only at energies in the range of 0,8 eV, i. e. they have an effective width of the forbidden zone considerably smaller, than the crystal silicon. This testifies to the fact that the atomic structure of these layers, which can be considered as layers of a nanostructured silicon (ns-Si), are different from the structure of the crystal Si [1].

The work [7] contains study of the influence of the temperature of growth on the photoluminescence of the structures with Ge(Si) islets, grown on the relaxed buffer layers of SiGe/Si(001) and situated between the strained Si-layers. It was demonstrated that with lowering of the growth temperature in the range of 700...630 °C the photoluminescence (PL) peak of the islets was shifted to the area of smaller energies, which was due to an increase in the content of Ge in the islets and suppression of blurring of the strained Si-layers. With a fall of the growth temperature from 630 down to 600 °C (fig. 2) a shift of the peak to the area of big energies was discovered. This can be explained by a change of the type of islets from a dome type to a hut type.

For a higher localization of the electrons in [11] it was proposed to use Ge(Si)-structures with self-forming islets grown on relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$ buffer layer and embedded in the strained Si-layer (e-Si-layer). At that, it was an effective potential hole for the electrons (fig. 3).

Position of the energy levels of the electrons in such a hole can be controlled by changing the composition of the buffer SiGe-layer and thickness of the e-Si-layer. Feasibility was demonstrated of an efficient control of the position of PL peak in relation to the islets due to changing of the thickness of e-Si-layers over and under the islets.

In fig. 4 it is visible, that with a reduction of the thickness of e-Si-layers above (d_1^{Si}) and under (d_2^{Si}) the islets from 3 nm down to 1 nm the position of the peak of photoluminescence from Ge (Si)/e-Si-islets is shifted to the area of high energies. The discovered shift is connected with the fact that a reduction of the thickness of e-Si-layers due to the quantum-dimensional effects results in expulsion of the first energy level of the electrons in e-Si-layers to the bottom of the zone of conductivity.

Besides, the work [11] demonstrated roughly a one-order increase of the signal strength of photoluminescence at 77 K from the Ge (Si) islets embedded in the strained e-Si-layer, in comparison with PL signal from the Ge (Si) islets grown on unstrained Si (001) substrates. The increase in intensity of the photoluminescence was connected with an effective localization of the electrons in the potential holes formed by e-Si-layers above and under the islets.

Photoconductivity of Si/Ge structures

Studying of the lateral photoconductivity in the Si/Ge structures, containing self-organizing Ge quantum dots, is important in connection with the prospects of such structures in optoelectronic devices [12].

Fig. 5 presents a spectral dependence of the longitudinal photoconductivity of Si/Ge structure with quantum dots of Ge (curve 1) at a room temperature. For comparison reasons also presented are the measurements of the spectral dependence of the longitudinal photoconductivity of the structures with nonuniform two-dimensional (2D) layers of Ge (curve 2) and a sample of monocrystal Si (c-Si), which did not contain Ge (curve 3)). The position of the long-wave edge of the measured spectra points to the fact that a photocurrent is caused by generation of the nonequilibrium charge carriers due to the indirect band-to-band transitions in Si.

A structure with quantum dots of Ge demonstrated a considerably higher photosensitivity in the area of energies of quanta of $1,0 < h\nu < 1,11$ eV, of a smaller width of the forbidden zone of c-Si at a room temperature ($E_g = 1,11$ eV). As is known, the form of the spectrum near the long-wave edge of photoconductivity is determined by a spectral dependence of the spectrum of optical absorption. Thus, the difference between the spectra of photoconductivity is due to the changes in the optical absorption of the heterostructures with the quantum dots [3]. In their turn, the effects of the dimensional quantization in the structures with quantum dots are determined by the sizes of the nanoclusters and, probably, elastic strains in the system.

A considerably bigger photoresponse of the structure with the quantum dots in IR-area $1,0...1,11$ eV can be explained by the fact that the compressed Si areas near a nano-islet have smaller width of the forbidden zone in comparison with a non-deformed Si-matrix. The nonequilibrium charge carriers generated in the compressed Si areas contribute to the photocurrent in the range of $1,0...1,11$ eV.

The band-to-band transitions in the silicon structures with the quantum dots of Ge were studied in the work [12] by the method of photocurrent spectroscopy in case of a cross-section direction of the applied shift voltage. The photosensitivity of ~ 10 mA/W in the range of 900–1200 meV was due to the indirect excitonic transitions between the hole states in Ge and the electronic states localized in Si.

It is possible to assume, that in the structures with the quantum dots of Ge the absorption in the range of 900...1200 meV is caused both by indirect transitions, and the transitions in the deformed epitaxial layers of Si near the nanoclusters. A relative contribution of each mechanism of absorption, possibly, depends on the density of the quantum dots, their sizes and uniformity of distribution, which demand an additional research [3].

With a reduction of temperature down to $T < 120$ K in the heterostructures with quantum dots a photosensitivity was discovered in the IR area of $0,4...1,15$ eV, where c-Si was transparent. Fig. 6 presents the spectral dependences of the longitudinal photoconductivity of a structure with

quantum dots (curve 1), a structure with nonuniform 2D layers of Ge (curve 2) and a sample of c-Si without Ge (curve 3) at 77 K.

In order to explain a continuous increase of the photoresponse with an increase of $h\nu$ in the spectral range of 0,4...1,15 eV of a heterostructure with quantum dots it is necessary to consider the zone diagram of Ge/Si. Usually these structures are considered to belong to type II, in which a potential hole exists only for the charge carriers of one sign. Energy of ionization of the basic state of the holes in a quantum dot in relation to the valent zone of Si is approximately 400 meV [3]. The insert to fig. 6 presents a zone diagram of the structure along the planar direction, passing through Ge nanocluster. The depicted bends of the zones near the heteroborder are due to a nonuniform deformation. As a result, potential holes for the electrons appear near the heteroborders of Ge/Si in silicon.

The spectra of the longitudinal photoconductivity of the multilayer structure of Si/Ge with Ge quantum dots [16, 17] were studied. Lines of optical transitions between the hole levels of the quantum dots and the electronic states of Si were observed. Fig. 7 presents the spectra of photoconductivity of two samples, measured at 78 K in the range of 0,3...1,2 eV. Feasibility of control of the spectrum of the electronic-hole states of a mass of Ge quantum dots by means of changing the parameters of growth of Si/Ge structure was established [16].

The value of the width of the forbidden zone of Si ($E_g = 1,12$ eV) is shown in fig. 7 by a vertical stroke line. Sample 1 with a mass of Ge quantum dots demonstrates a wide peak of photoresponse in the range of 0,6...0,9 eV. It is visible, that its form is a result of a superposition of the lines of three doublets, which are shown in the form of weak features marked on curve 1 (fig. 7) by small arrows. The doublet splitting is equal to 30 meV, and the distance between the doublets is 80 meV. The structure of the photoconductivity spectrum is well reproduced for the samples with a smaller content of pseudomorphous Ge quantum dots in the mass (~50 %). In those cases the basic wide peak is already washed away in the continuously falling down wing because of a nonuniform strain relaxation. Thus, the presence of small peaks (fig. 7, curve 1, small arrows) shows, that a rather big number of pseudomorphous Ge quantum dots are contained in the investigated mass [17].

Sample 2, the spectrum of photoconductivity of which is also presented in fig. 7 (curve 2), was obtained at a higher growth temperature of the Si layers ($T_s \approx 500$ °C), than sample 1 ($T_s \approx 450$ °C). In this case the value of the strain in the quantum dots decreases by 20 %, and their sizes increase as a result of a mutual mixing of components during growth. The doublet structure (fig. 7, curve 2, lines A and B) is connected with the electronic levels of Si formed in a deformation potential hole near the heteroborders of Si/Ge. The peaks of the spectrum of photoconductivity marked by arrows on curve 2, were caused by the optical transitions between the hole levels of the quantum dots and the states of the conductivity zone of Si [17].

The works [18, 19] the authors experimentally discovered the phenomenon of a negative photoconductivity in the quantum dots of Ge/Si, consisting in a reduction of conductivity of a layer with the quantum dots under illumination. The mechanism of the negative photoconductivity consists in the following. Let us consider Si of n -type with embedded nanoislets of unalloyed Ge. In the darkness the conductivity of the system is determined by free electrons in the zone of conductivity of Si, which appeared there as a result of a thermal ionization of the donors [18].

In their absence in the quantum dots of the holes on the heteroborder of Ge/Si there is a small state for an electron with a binding energy of $E_t \approx 9$ meV owing to the non-uniform deformations leading to formation of a potential hole for an electron. Therefore, a balanced concentration of the electrons in the zone of conductivity will be lowered due to their trapping on this level.

During absorption of light causing band-to-band transitions and formation of pairs of electrons and holes, the holes start to accumulate in the Ge quantum dots, charging them positively. As a result on Ge/Si heteroborders potential holes for electrons appear in silicon, in which photoelectrons will start to accumulate. With a growing number of holes in the islets (due to an increase in the intensity of illumination) the energy of the deposited "superfluous" electronic level increases. With the progress of embedding of the level, the degree of its filling with electrons grows, the concentration of the electrons in the zone of conductivity decreases, and the conductivity of the system goes down.

Electroluminescence of Si/Ge structures

In works [20, 21] the photo-electric properties and electroluminescence (EL) of p - i - n diodes on the basis of GeSi/Si heterostructures with GeSi nanoclusters in i -area were investigated. For measurement of EL an Au/Ti ohmic contact with diameter of 0,5 mm was formed on the surface of the samples on the side from the structure. The second ohmic contact was formed by deposition of a continuous A 1 film on the reverse side of the substrate. The structures with contacts were broken into separate slices (chips) with the size of 2×2 mm. Measurements of EL spectra were done on the chips in a pulse mode in order to avoid overheating of the samples. Duration of the pulses was 4 ms, the repetition period — 25 ms. The EL spectra were registered by means of a photodetector cooled by liquid nitrogen. EL was observed at various temperatures. It was discovered, that the structures with the islets grown at 600 °C possess the greatest signal strength of EL at a room temperature in the range of wavelengths of 1,3...1,55 μm (fig. 8).

Annealing of the structures with Ge(Si)-islets leads to an increase of EL signal strength at low temperatures, but worsens the temperature stability of this signal (fig. 9), which is due to an additional diffusion of Si in the islets during annealing.

An essential growth of EL signal strength was discovered with an increase of the thickness of the dividing Si-

layer (fig. 10). This was explained by a reduction of the elastic stress in the structure with an increase of the thickness of this layer.

As a result of comparison of the photoluminescence spectra, of the electroluminescence of Si/Ge nanoheterostructures with Ge quantum dots, obtained in various ways, it is possible to conclude, that these dots introduced in the volume matrix of Si, provoke appearance of a peak in the range of 0,7...0,9 eV, which corresponds to the range of the wavelengths of 1,3...1,55 μm . At that, the width and position of the maxima of the photoluminescence and electroluminescence signals, connected with Ge quantum dots, is determined by scattering of the parameters of the quantum dots, their sizes, density in a mass, and also diffusion of Ge and Si.

In the photoconductivity spectra of the Si/Ge structures, containing Ge quantum dots, a prolongation of the photoresponse is observed in the IR area up to the values of the photon energies of 0,4...0,9 eV. The differences in the spectra of photoconductivity are due to the changes in the optical absorption of the heterostructures with the quantum dots. In turn, the effects of the dimensional quantization in the structures with the quantum dots are determined by the sizes of the nanoclusters and, probably, by the elastic stresses in the system.

Conclusion

A review was done of the electronic structure and optical properties of the materials on the basis of Si/Ge with quantum dots, and of the literature devoted to the research of the photoelectric properties of Ge/Si nanoheterostructures with Ge quantum dots.

High efficiency of absorption of radiation, polarized in the plane of growth, which is observed according to the data of spectroscopy of photoconductivity for p-Si/Ge structures, testifies to the good prospects of their application in the detectors for medium IR range, and also in the matrices demanding normal falling of radiation and high uniformity of pixels.

The research was done with the financial support of RFFI within the framework of the scientific project r_Siberia_a № 13-02-98023.

References

1. Shklyayev A. A., Ichikava M. Predelno plotnyie massivy nanostruktur germaniya i kremniya. *Uspehi fizicheskikh nauk*. 2008. V. 178, N. 2. P. 139–169.
2. Voytsehovskiy A. V., Kulchitskiy N. A., Melnikov A. A., Nesmelov S. N., Kohanenko A. P., Lozovoy K. A. Tekhnologiya sozdaniya struktur s kvantovymi tochkami molekulyarnoluchevoy epitaksiiy Ge/Si. *Nano i mikrosistemnaya tekhnika*. 2014. N. 9. P. 20–30.
3. Kondratenko S. V., Nikolenko A. S., Vakulenko O. V., Golovinskiy S. L., Kozyrev Yu. N., Rubezhanskaya M. Yu., Vodyanitskiy A. I. Prodolnaya fotoprovodimost geterostruktur Ge/Si s kvantovymi tochkami Ge. *FTP*. 2007. V. 41, N. 8. P. 955–958.
4. Egorov V. A., Tsyrlin G. E., Tonkih A. A., Talalaev V. G., Makarov A. G., Ledentsov N. N., Ustinov V. M., Zakharov N. D., Werner P. Si/Ge nanostrukturny dlya primeneniya v optoelektronike. *FTT*. 2004. V. 46, N. 1. P. 53–59.
5. Voytsehovskiy A. V., Kohanenko A. P., Lozovoy K. A., Turapin A. M., Romanov I. S. Fotochuvstvitelnyie struktury na osnove nanogeterostruktur Si/Ge dlya opticheskikh sistem peredachi informatsii. *Uspekhi prikladnoy fiziki*. 2013. V. 1, N. 3. P. 338–343.
6. Pchelyakov O. P., Bolhovityanov Yu. B., Dvurechenskiy A. V., Sokolov L. V., Nikiforov A. I., Yakimov A. I., Foyhtlender B. Kremniy-germanievyye nanostrukturny s kvantovymi tochkami: mehanizmy obrazovaniya i elektricheskie svoystva. *FTP*. 2000. V. 34, N. 11. P. 1281–1299.
7. Shaleev M. V., Novikov A. V., Yablonskiy A. N., Kuznetsov O. A., Drozdov Yu. N., Lobanov D. N., Krasilnik Z. F. Vliyaniye temperatury rosta na fotolyuminesentsiyu samoformiruyuschihsya ostrovkov Ge(Si), zaklyuchennykh mezhdu napryazhennymi sloyami Si. *FTP*. 2007. V. 41, N. 11. P. 1375–1380.
8. Li H., He T., Dai L., Wang X., Wang W., Chen H. Temperature dependence of photoluminescence from self-organized Ge quantum dots with large size and low density. *Science China. Physics, Mechanics and Astronomy*. 2011. V. 54, N. 2. P. 245–248.
9. Vostokov N. V., Krasilnik Z. F., Lobanov D. N., Novikov A. V., Shaleev M. V., Yablonskiy A. N. Vliyaniye skorosti osazhdeniya Ge na rost i fotolyuminesentsiyu samoformiruyuschihsya ostrovkov Ge(Si)/Si(001). *FTT*. 2005. V. 47, N. 1. P. 41–43.
10. Shamirzaev T. S., Seksenbaev M. S., Zhuravlev K. S., Nikiforov A. I., Ulyanov V. V., Pchelyakov O. P. Fotolyuminesentsiya kvantovyykh tochek germaniya, vyirashchennykh v kremnii na submonosloey SiO₂. *FTT*. 2005. V. 47, N. 1. P. 80–82.
11. Shaleev M. V., Novikov A. V., Yablonskiy A. N., Kuznetsov O. A., Drozdov Yu. N., Krasilnik Z. F. Vliyaniye napryazhennogo Si-sloya na fotolyuminesentsiyu Ge(Si) samoformiruyuschihsya ostrovkov, vyirashchennykh na relaksirovannykh SiGe/Si-bufernykh sloyakh. *FTP*. 2007. V. 42, N. 2. P. 172–176.
12. Shegay O. A., Markov V. A., Nikiforov A. I. Indutsirovannaya mezhzonnyim svetom stupenchataya fotoprovodimost struktur Si/Ge s kvantovymi tochkami. *FTT*. 2004. V. 46, N. 1. P. 77–79.
13. Brunner K. Si/Ge nanostructures. *Rep. Prog. Phys.* 2002. V. 65, N. 27. P. 27–72.
14. Wang K. L., Tong S., Kim H. J. Properties and application of SiGe nanodots. *Material Science in Semiconductor Processing*. 2005. V. 8. P. 389–399.
15. Boucaud P., Sauvage S., Elkurdi M., Mercier E., Brunhes T., Thanh V. Le, Bouchier D. Optical recombination from excited states in Ge/Si self-assembled quantum dots. *Physical review B*. 2001. V. 64. P. 155310 (1–6).
16. Talochkin A. B., Chistohin I. B., Markov V. A. Prodolnaya fotoprovodimost mnogoslownykh Ge/Si-struktur s kvantovymi tochkami Ge. *FTP*. 2009. V. 43, N. 8. P. 1034–1038.
17. Talochkin A. B., Chistohin I. B. Fotoprovodimost mnogoslownykh struktur Si/Ge s kvantovymi tochkami Ge, psevdomorfnymi k Si-matritse. *FTP*. 2011. V. 45, N. 7. P. 936–940.
18. Dvurechenskiy A. V., Yakimov A. I. Kvantovyye točki 2 tipa v sisteme Ge/Si. *FTP*. 2001. V. 35, N. 9. P. 1143–1153.
19. Antonov A. V., Aleshkin V. Ya., Gavrilenko V. I., Krasilnik Z. F., Novikov A. V., Shaleev M. V. Otritsatel'naya fotoprovodimost v srednem IK-diapazone selektivno legirovannykh geterostruktur SiGe/Si:B s dvumemyim dyirochnym gazom. *FTT*. 2005. V. 47, N. 1. P. 47–49.
20. Maksimov G. A., Krasilnik Z. F., Filatov D. O., Kruglova M. V., Morozov S. V., Remizov D. Yu., Nikolichev D. E., Shengurov V. G. Fotoelektricheskie svoystva i elektrolyuminesentsiya p-i-n-diodov na osnove geterostruktur s samoorganizovannymi nanoklasternami GeSi/Si. *FTT*. 2005. V. 47, N. 1. P. 26–28.
21. Lobanov D. N., Novikov A. V., Kudryavtsev K. E., Shengurov D. V., Drozdov Yu. N., Yablonskiy A. N., Shmagin V. B., Krasilnik Z. F., Zakharov N. D., Werner P. Vliyaniye parametrov Ge(Si)/Si(001) samoformiruyuschihsya ostrovkov na ih elektrolyuminesentsiyu pri komnatnoy temperature. *FTP*. 2009. V. 43, N. 3. P. 332–336.