

## Оптические свойства монослоев германия на кремнии

© Т.М. Бурбаев<sup>¶</sup>, Т.Н. Заварицкая, В.А. Курбатов, Н.Н. Мельник, В.А. Цветков,  
К.С. Журавлев\*, В.А. Марков\*, А.И. Никифоров\*

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
117924 Москва, Россия

\* Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 10 января 2001 г. Принята к печати 16 января 2001 г.)

Исследованы спектры фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света тонких слоев германия на кремнии, выращенных при низкой температуре (250°C). Показано, что в таких структурах, в отличие от структур, выращенных при высокой температуре, люминесценция квантовых ям наблюдается при толщине германия, превышающей  $\sim 9$  монослоев. С развитием дислокаций несоответствия линии люминесценции квантовых ям сдвигаются в область больших энергий, а поперечные оптические фононы, участвующие в люминесценции, распространяются в квазидвумерном слое германия. Показано, что введение дополнительного релаксированного подслоя  $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$  в многослойную структуру Ge/Si приводит к значительному росту интенсивности и сужению линии люминесценции квантовых точек (до 24 мэВ), что указывает на их существенное упорядочение.

### Введение

Наноструктуры, состоящие из тонких слоев германия на кремнии, вызывают возрастающий интерес исследователей в связи с перспективой их использования в различных электронных и оптоэлектронных устройствах [1]. В частности, одно из важных применений связано с осуществлением в таких структурах квазипрямозонной люминесценции для создания на базе кремниевой интегральной технологии излучателей в области длин волн вблизи 1.5 мкм, необходимых для оптоволоконных систем связи. Квазипрямые переходы в не прямых полупроводниках возможны при локализации свободных носителей заряда. Такая локализация наблюдается в многослойных ковариантных гетероструктурах Ge/Si и SiGe/Si. Электроны при этом обычно локализируются в квантовой яме (КЯ) кремния, а дырки в квантовой яме германия. Другая возможность локализации связана с явлением самоорганизации на поверхности кремния под действием гетероэпитаксиальных напряжений с образованием ансамбля нанокластеров — квантовых точек (КТ). Различие параметров кристаллических решеток кремния и германия (монослой германия равен  $\sim 1.4 \text{ \AA}$ , кремния  $\sim 1.35 \text{ \AA}$ ) приводит к тому, что стадия псевдоморфного двумерного роста при гетероэпитаксии сохраняется до некоторой критической толщины  $h_c$  пленки германия, близкой к четырем монослоям (МС) — смачивающий слой. С повышением толщины напряжения снимаются путем самосогласованного роста бездислокационных кластеров германия на поверхности кремния по механизму Странского–Крастанова. Сначала образуются так называемые "hut-кластеры", имеющие форму четырехгранных пирамид (hut clusters), затем большие по размеру "dome-кластеры". При дальнейшем

повышении толщины происходит пластическая релаксация напряжений с образованием дислокаций. Вследствие малости размеров кластеров в них проявляются эффекты размерного квантования электронного спектра. В работах [2,3] отмечено, что снижение температуры роста  $T_s$  до 200°C приводит к уменьшению размеров нанокластеров, росту их плотности и к возрастанию  $h_c$ . Интенсивность квазипрямозонной фотолюминесценции КТ должна усиливаться при уменьшении размеров и при улучшении пространственной однородности формируемых нанокластеров. Одним из способов упорядочения нанокластеров является последовательное наращивание слоев с кластерами германия, которые зарождаются слоями кремния (вертикальная самоорганизация). В [3] приведен спектр фотолюминесценции такой структуры. Из литературы известно, что существенное изменение структуры ансамбля нанокластеров происходит в узком диапазоне толщин германия, примерно до 15 МС. В работе [4] этот вывод подтвержден с помощью сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии, в работе [2] — на основании исследования комбинационного рассеяния света.

### Образцы и методика измерений

Мы исследовали спектры низкотемпературной фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света в диапазоне толщин германия до  $\sim 15$  МС. Многослойные структуры с различными толщинами слоев Ge и Si выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках кремния  $n$ - или  $p$ -типа проводимости (5–20 Ом · см) ориентации (001). После стандартной операции очистки поверхности на подложке при  $T_s \approx 800^\circ\text{C}$  выращивался буферный слой кремния, затем при более низкой температуре наращивались периодические структуры, состоящие из слоев Ge и более толстых

<sup>¶</sup> E-mail: burbaev@sci.lebedev.ru

## Режим роста структуры

Образец 8		Образец 9	
Si, 235 Å, 450°C	} × 7	Si, 235 Å, 450°C	} × 6
Si, 20 Å, 250°C		Si, 20 Å, 250°C	
Ge, 10 Å, 250°C		Ge, 8 Å, 250°C	
Si, 100 Å, 450°C		Si, 100 Å, 450°C	
Si, 1150 Å, 780°C		Si <sub>0.95</sub> Ge <sub>0.05</sub> , 700 Å, 450°C	} Отжиг после роста при 1050°C
Подложка: <i>p</i> -Si, 7.5 Ом · см		Si, 1150 Å, 780°C	
		Подложка: <i>p</i> -Si, 7.5 Ом · см	

Образец 15	Образец 48	Образец 66
Si, 235 Å, 450°C	Si, 300 Å	Si, 400 Å
Si, 20 Å, 250°C	Ge, 13 Å, 300°C	Si, 100 Å
Ge, 13 Å, 250°C	Si, 700 Å	Ge, 12 Å
Si, 100 Å, 450°C	Подложка: <i>n</i> -Si, 7.5 Ом · см	Si, 400 Å
Si, 1150 Å, 780°C		Подложка: <i>n</i> -Si, 7.5 Ом · см
Подложка: <i>n</i> -Si, 4.5 Ом · см		

слоев Si. На заключительной стадии структура покрывалась защитной пленкой кремния толщиной в несколько сотен ангстрем. Данные о режимах роста обсуждаемых далее структур приведены в таблице.

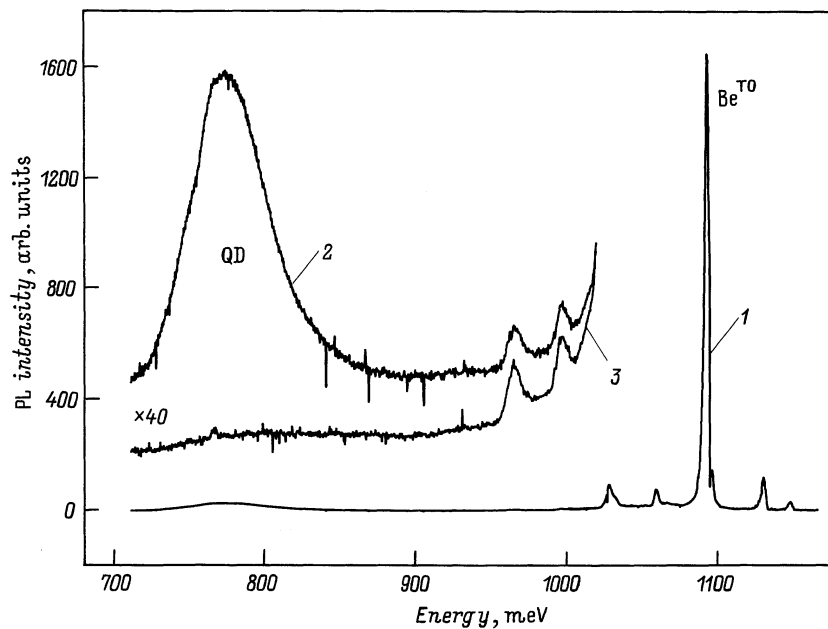
Спектры фотолюминесценции (PL) измерялись при температуре  $T = 2$  К с использованием монохроматора МДР-2. Источником возбуждения служил полупроводниковый лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 0.66$  мкм (энергия кванта  $h\nu = 1.87$  эВ). Максимальная мощность излучения была равна 70 мВт, плотность мощности излучения на образце обычно составляла 4 Вт/см<sup>2</sup>. Излучение от образцов регистрировалось с помощью охлаждаемого жидким азотом германиевого *p-i-n*-фотодиода. На некоторых образцах для большей уверенности, что светят квантовые точки или смачивающий слой, а не подложка, мы смотрели спектры люминесценции с двух сторон. Фотовозбужденные носители при  $\lambda = 0.66$  мкм в основном образуются в области глубиной до нескольких микрометров вблизи освещаемой поверхности. При освещении со стороны структуры область фотовозбуждения захватывает структуру и несколько микрометров подложки, а при освещении со стороны подложки — только несколько микрометров подложки, так как толщина образца 300 мкм и свет с обратной стороны до структуры не доходит. При обычных длинах диффузии фотоносителей для кремния в первом случае мы видим излучение как структуры, так и подложки, а во втором — преимущественно подложки.

Измерение спектров комбинационного рассеяния света на оптических фонах производилось при комнатной температуре. Возбуждение производилось аргоновым лазером ( $\lambda = 0.488$  мкм), излучение регистрировалось спектрометром U-1000.

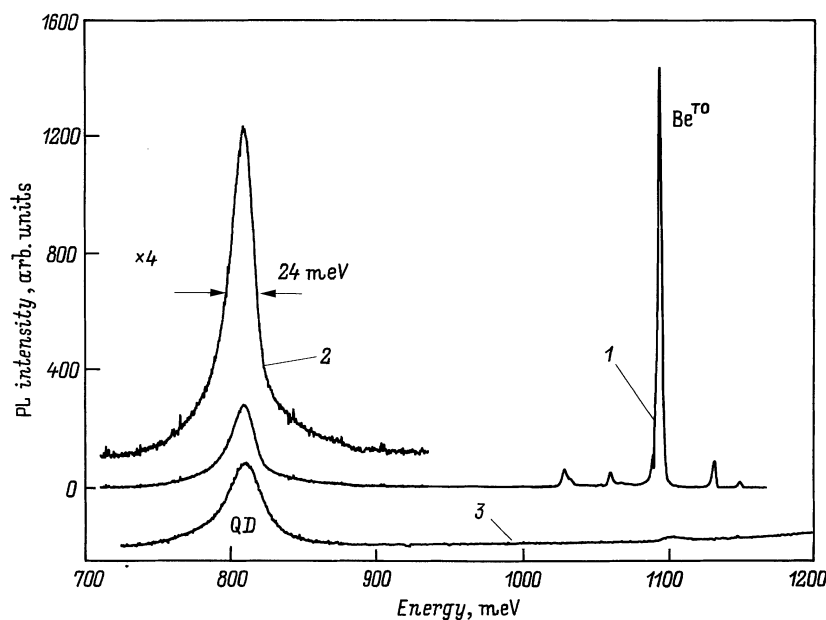
## Результаты и обсуждение

Измеренные спектры фотолюминесценции представлены на рис. 1–5. На рисунках приведены спектры как структуры, так и подложки. Излучение квантовых точек возникает начиная с толщин германия  $\geq 4$  МС сначала в виде слабой по интенсивности широкой полосы (QD) в диапазоне  $h\nu = 0.75–0.85$  эВ. С увеличением толщины до 6–8 МС интенсивность излучения увеличивается, а полоса сужается. При дальнейшем увеличении толщины германия ( $> 10–15$  МС) кластеры смыкаются в сплошной слой и релаксация напряжений идет путем образования дислокаций несоответствия. Излучение при этом вновь представляет широкую слабую по интенсивности полосу, на фоне которой иногда просматриваются слабые линии от дислокаций, а затем вовсе исчезает. Границы области толщин германия, в пределах которых интенсивность излучения максимальна, изменяются в зависимости от температуры роста, скорости роста, наличия дополнительных подслоев SiGe, снимающих внутренние напряжения. При одинаковых параметрах роста линии излучения сдвигаются в красную область спектра с увеличением толщины германия.

Введение дополнительного релаксированного SiGe-подслоя (образец 9) приводит, по-видимому, к упорядочению КТ, интенсивность излучения при этом возрастает, а линия излучения сужается. Ширина линии излучения КТ в этом образце (по уровню 0.5) равна 24 мэВ. Следует отличать линии излучения квантовых точек от линий излучения дислокаций в кремнии (линия  $D_1$  — 810 мэВ, линия  $D_2$  — 870 мэВ), находящихся в этом же диапазоне энергий. Следующие доводы свидетельствуют в пользу того, что в образце 9 светят именно квантовые точки.



**Рис. 1.** Спектр фотолюминесценции образца 8 при  $T = 2$  К и участок спектра структуры (2) и подложки (3) при увеличении чувствительности. QD — люминесценция квантовых точек;  $Be^{TO}$  — линия излучения связанного экситона с испусканием поперечного оптического фонона.



**Рис. 2.** Фотолюминесценция образца 9 с дополнительным SiGe-подслоем при  $T = 2$  (1, 2) и 77 К (3).

1) Линии  $D_1$  и  $D_2$  появляются обычно парами, ширина дислокационных линий  $\sim 10$  мэВ. При повышении температуры до 77 К интенсивность люминесценции дислокаций уменьшается в несколько раз. В образце 9 наблюдается одиночная линия излучения (809 мэВ), интенсивность люминесценции которой при 2 и 77 К почти одна и та же (рис. 2).

2) В образцах с толщинами германия  $\sim 10$  МС, где релаксация напряжений действительно происходит с

образованием дислокаций, их излучение незначительно или вовсе не просматривается (рис. 3, структура 15).

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) позволяют сделать вывод о степени релаксации напряженных слоев германия на кремнии. Такие спектры для образцов 8, 9 и 15 представлены на рис. 6. В образце 8 наблюдаются линии  $520\text{ см}^{-1}$  (оптический фонон в кремнии),  $420\text{ см}^{-1}$  (колебания Si-Ge-связей),  $316\text{ см}^{-1}$  (оптический фонон в напряженном германии). Посколь-

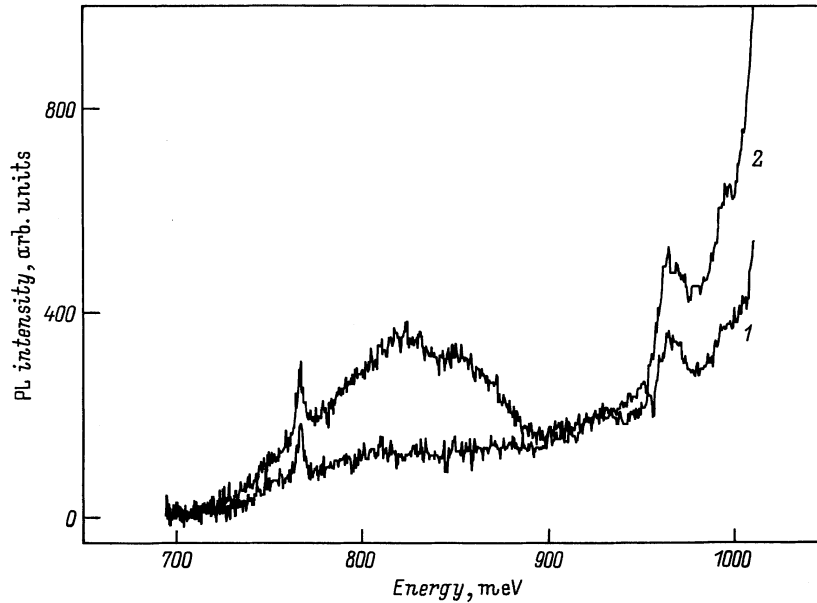


Рис. 3. Спектры фотолуминесценции образца 15 при  $T = 2$  К: 1 — структура, 2 — подложка.

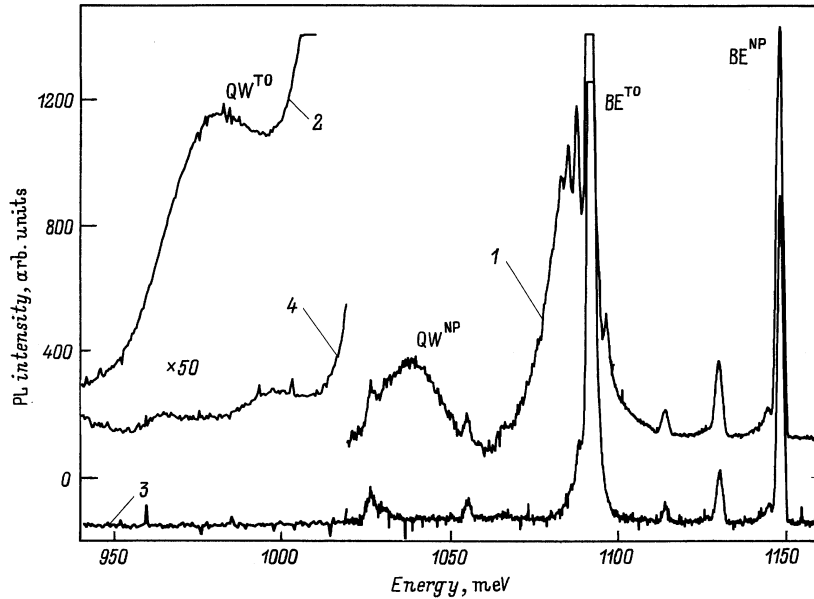
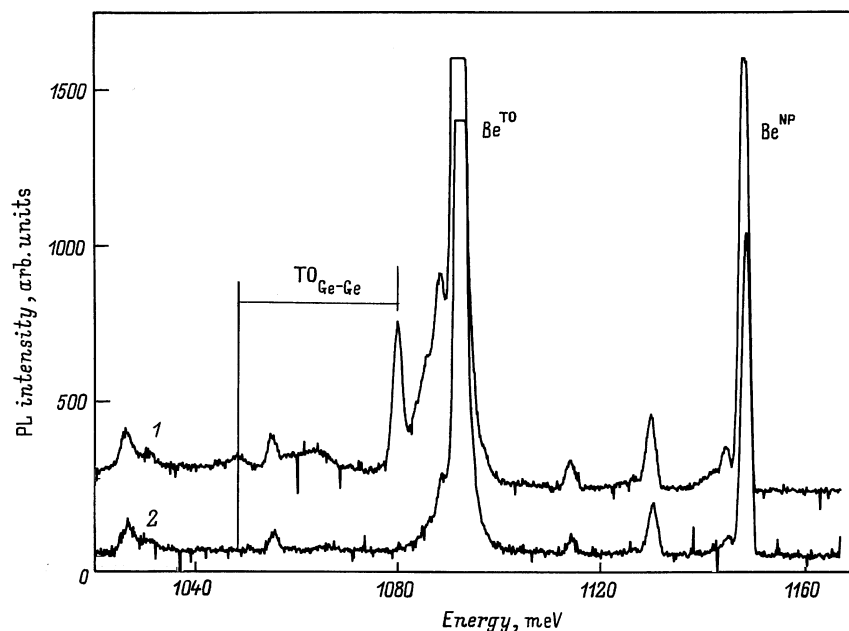


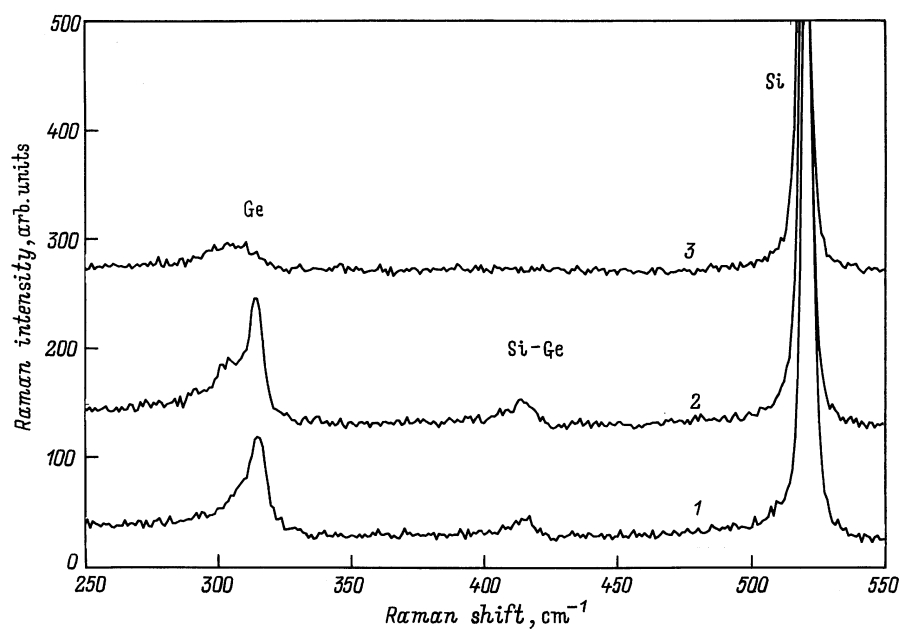
Рис. 4. Спектр фотолуминесценции одиночной КЯ образца 48 ( $13 \text{ \AA Ge}$ ) (1, 2) в сравнении со спектром излучения подложки (3, 4) при  $T = 2$  К.  $QW^{NP}$ ,  $QW^{TO}$  — полосы люминесценции КЯ, бесфононная и с испусканием поперечного оптического фона соответственно.  $BE^{NP}$ ,  $BE^{TO}$  — линии люминесценции связанного экситона, бесфононная и с испусканием поперечного оптического фона соответственно.

ку частота оптического фона линейно зависит от деформации, то, как это показано в [2], при релаксации напряжений на дислокациях проявляется линия  $300 \text{ см}^{-1}$ , соответствующая оптическому фону в объемном германии. В образце 9 линия вблизи  $300 \text{ см}^{-1}$  существенно слабее линии  $316 \text{ см}^{-1}$ , т.е. в этом образце плотность дислокаций относительно невелика. Проявление линии  $300 \text{ см}^{-1}$ , по-видимому, обусловлено релаксированным подслоем SiGe.

В работе [5] показано, что в структурах Si/Ge/Si, выращенных при температурах  $T_s = 700^\circ\text{C}$ , люминесценция квантовой ямы (КЯ) (т.е. напряженного смачивающего слоя) и квантовых точек конкурируют друг с другом. При малых толщинах германия преобладает излучение КЯ. С образованием КТ излучение ям становится слабее, а излучение точек усиливается. Слои германия в наших образцах были получены при низкой температуре,  $T_s = 250\text{--}300^\circ\text{C}$ . Длина диффузии



**Рис. 5.** Фотолуминесценция КЯ образца 66 при  $T = 2$  К: 1 — структура, 2 — подложка.  $Be^{NP}$ ,  $Be^{TO}$  — линии люминесценции связанного экситона, бесфононная и с испусканием поперечного оптического фонона соответственно.



**Рис. 6.** Спектры комбинационного рассеяния света. Образцы: 1 — 8, 2 — 9, 3 — 15.

адатомов при низких температурах мала, поэтому образование *hut*-кластеров, ответственных за излучение КТ, происходит одновременно с ростом смачивающего слоя, начиная с нулевой толщины. По этой причине излучение КЯ в диапазоне толщин  $\leq 8$  МС мы не наблюдали, оно подавлено излучением нанокластеров. Излучение КЯ мы наблюдали при толщинах  $\geq 9$  МС, когда отдельные кластеры начинают исчезать, сливаясь в сплошной слой с развитием дислокаций несоответствия. Спектры люми-

несценции таких образцов (48 и 66) приведены на рис. 4 и 5. Бесфононная линия  $QW^{NP}$  в образце 48 наблюдается при энергии 1039 мэВ. При энергии 982 мэВ наблюдается фононное повторение  $QW^{TO}$  — излучение с испусканием поперечного оптического фонона в кремнии,  $TO_{Si-Si}$ -фонона (59 мэВ). В образце 66 бесфононная линия наблюдается при энергии 1080 мэВ, линия фононного повторения (1048 мэВ) отстоит от нее примерно на энергию поперечного оптического фонона в германии,

TO<sub>Ge-Ge</sub>-фонона. Сдвиг бесфононной линии в сторону больших энергий связан, по-видимому, с уменьшением энергетического разрыва краев валентных зон слоев германия и кремния, вызванным частичной релаксацией напряжений на дислокациях несоответствия. Спектр КРС этого образца похож на спектр образца 15, что указывает на наличие релаксированного слоя Ge. В области 700–900 мэВ в этом образце, в отличие от образца 48, наблюдается интенсивное излучение дислокаций как при облучении возбуждающим светом образца со стороны структуры, так и при облучении с обратной стороны, со стороны подложки. По-видимому, релаксация напряжений при не очень больших толщинах Ge спровоцирована высокой плотностью исходных дислокаций в подложке образца.

## Заключение

Таким образом, показано, что в структурах Ge/Si, выращенных при низких температурах (200–300°C), существенное изменение в спектрах фотолюминесценции, обусловленное конкуренцией излучения от квантовых точек и квантовых ям, происходит вплоть до толщин германия  $\sim 15$  МС. В отличие от структур, выращенных при высоких температурах (600–700°C), в которых люминесценция КЯ преобладает при толщинах  $\leq 4$  МС, в этих структурах люминесценция КЯ наблюдается при толщинах  $\geq 9$  МС. С развитием дислокаций несоответствия линии люминесценции КЯ сдвигаются в область больших энергий. Отметим, что при этом поперечные оптические фононы, участвующие в люминесценции, распространяются в квазидвумерном слое германия.

Показано также, что введение дополнительного релаксированного SiGe-подслоя в многослойную структуру Ge/Si приводит к значительному увеличению интенсивности излучения КТ и сужению линии излучения.

Авторы выражают признательность Н.Н. Сибельдину за обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 99-02-16675 и № 00-02-17864), программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант № 00-15-96568) и научно-технических программ "Физика твердотельных наноструктур" (проект № 2000-2Ф) и "Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники" (проект № 1).

## Список литературы

- [1] P. Schittenhelm, C. Engel, F. Findeis, G. Abstreiter, A.A. Darhuber, G. Bauer, A.O. Kosogov, P. Werner. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16** (3), 1575 (1998).
- [2] А.Б. Талочкин, А.В. Ефанов, В.А. Марков, А.И. Никифоров. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **63**, 290 (1999).
- [3] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, Б. Фойхтлендер. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **64**, 205 (2000).

- [4] Ю.Г. Садофьев, Т.М. Бурбаев, В.А. Курбатов, М.М. Рзаев, В.А. Цветков, М.В. Байзер, С.Ю. Садофьев, Ю.В. Ларионов. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **64**, 273 (2000).
- [5] L.P. Rokhinson, D.C. Tsui, J.L. Benton, Y.-H. Xie. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2413 (1999).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## Optical properties of germanium monolayers on silicon

T.M. Burbaev, T.N. Zavaritskaya, V.A. Kurbatov, N.N. Melnik, V.A. Tsvetkov, K.S. Zhuravlev\*, V.A. Markov\*, A.I. Nikiforov\*

P.N. Lebedev Physical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
117924 Moscow, Russia

\* Institute of Semiconductor Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** The luminescence and Raman spectra of thin germanium layers on silicon grown at a low temperature (250°C) have been investigated. In contrast to structures grown at high temperatures the quantum well luminescence has been observed when germanium thickness exceeds  $\sim 9$  monolayers. The misfit dislocation development shift, the quantum well luminescence lines to the high energy region, while TO phonons, participating in luminescence, are confined within the quasi-two-dimensional layer of germanium. It has been shown that the introduction of an additional relaxed Si<sub>0.95</sub>Ge<sub>0.05</sub> sublayer in the multilayer Ge/Si structure leads to a substantial rise in the intensity and the narrowing of the quantum dot luminescence line (to 24 meV), that is an evidence in favour of their noticeable ordering.