

Фотолюминесценция квантовых точек германия, выращенных в кремнии на субмонослое SiO_2

© Т.С. Шамирзаев, М.С. Сексенбаев, К.С. Журавлев, А.И. Никифоров, В.В. Ульянов, О.П. Пчеляков

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

E-mail: timur@thermo.isp.nsc.ru

Исследована температурная зависимость фотолюминесценции квантовых точек в структурах $\text{Si}/\text{Ge}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ и $\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$. Малые значения энергии активации температурного гашения фотолюминесценции квантовых точек в обоих типах изученных структур объяснены термостимулированным захватом дырок из квантовых точек на уровни дефектов, локализованных в их окрестности.

Работа выполнена при частичной поддержке INTAS (грант N 01-0444) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 03-02-16468).

Структуры с квантовыми точками (КТ) на основе Si/Ge привлекают повышенное внимание исследователей вследствие их возможного внедрения в современную кремниевую технологию [1,2]. Известно, что формирование КТ в полупроводниках с различными параметрами кристаллической решетки происходит по механизму Странского–Крастанова. При росте слоев германия на кремнии сначала образуется смачивающий слой германия толщиной около 4 ML, а затем на нем формируются островки германия [3]. Недавно было обнаружено, что формирование германиевых КТ на окисленной поверхности происходит по механизму Фольмера–Вебера без образования смачивающего слоя [4]. В настоящее время известно, что размеры КТ в системе $\text{Si}/\text{Ge}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ меньше, а их плотность существенно больше, чем в системе $\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$ [4,5], изучены структурные свойства этих объектов [6]. В то же время электронная структура и рекомбинация носителей заряда в таких КТ до сих пор не изучались.

Целью данной работы является сравнительное исследование рекомбинации носителей заряда в КТ в системах $\text{Si}/\text{Ge}/\text{Si}$ и $\text{Si}/\text{Ge}/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Полученные результаты согласуются с выводами работы [4] о том, что введение слоя SiO_2 стимулирует формирование КТ германия без образования смачивающего слоя. Низкие значения энергий активации гашения фотолюминесценции (ФЛ) при повышении температуры указывают то, что при этом дырки с уровней размерного квантования переходят не в валентную зону кремния, а попадают на уровни дефекта, локализованного в окрестности КТ.

1. Методика эксперимента

Исследуемая структура была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке $\text{Si}(100)$ при температуре подложки 550°C . Непосредственно перед формированием слоя КТ поверхность кремния окислялась при температуре 500°C в течение 10 min путем напуска в ростовую камеру кислорода при давлении $P = 10^{-4}$ Pa. Толщина сформированного слоя SiO_2

составляла 1–2 ML. На подготовленный таким образом слой SiO_2 высаживался слой Ge толщиной 3 ML. Рост германия проводился при температуре подложки 550°C . Для сравнения были также выращены структура с тонким слоем SiO_2 без высаживания слоя Ge и структура с КТ Ge в матрице Si без предварительного окисления поверхности Si. Структура выращивалась при температуре 700°C на подложке $\text{Si}(100)$ и содержала пять пар слоев Ge и Si с толщиной слоя Ge 8 ML. ФЛ возбуждалась излучением аргонового лазера ($\lambda = 488$ nm) с плотностью мощности 10 W/cm², анализировалась двойным дифракционным монохроматором и регистрировалась охлаждаемым германиевым рп-диодом в режиме синхронного детектирования. Измерения проводились в интервале температур $T = 5$ – 125 K.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измеренные при 5 K спектры ФЛ структур с КТ Ge, сформированными на неокисленной и окисленной поверхностях Si, а также спектр структуры с тонким слоем SiO_2 без высаживания слоя Ge представлены на рис. 1 и 2. В спектрах всех структур с КТ Ge наблюдается линия с энергией максимума около $h\nu = 1.1$ eV, связанная с рекомбинацией экситонов в объеме кремния. Кроме того, в спектрах структур с КТ германия присутствует линия с энергией максимума около $h\nu = 0.8$ eV (последняя обозначена буквой *T*). Отсутствие линии *T* в спектре структуры $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ свидетельствует о том, что эта линия обусловлена рекомбинацией в КТ германия. В высокоэнергетической области спектра структуры $\text{Si}/\text{Ge}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ наблюдаются две линии с энергиями $h\nu = 1.08$ и 1.06 eV (обозначены цифрами 1 и 2), связанные либо с двухфононными повторениями экситонных линий, либо с переходами зона–примесь в кремниевой матрице [7]. Уточнение природы этих линий требует проведения дополнительных исследований, которые выходят за рамки данной работы. Кроме того, в спектре структуры с КТ, сформированными без

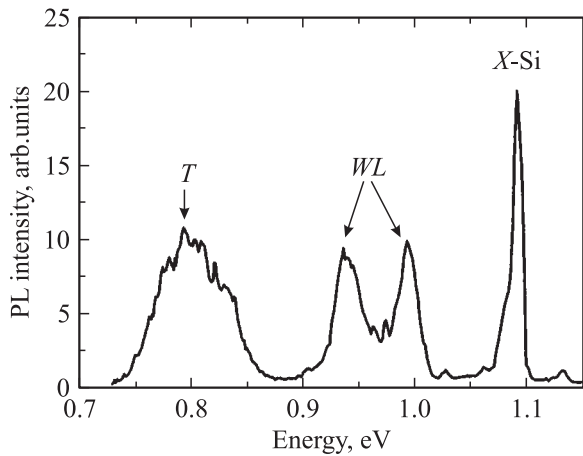


Рис. 1. Спектр ФЛ структуры с КТ Si/Ge/Si, измеренный при 5 К.

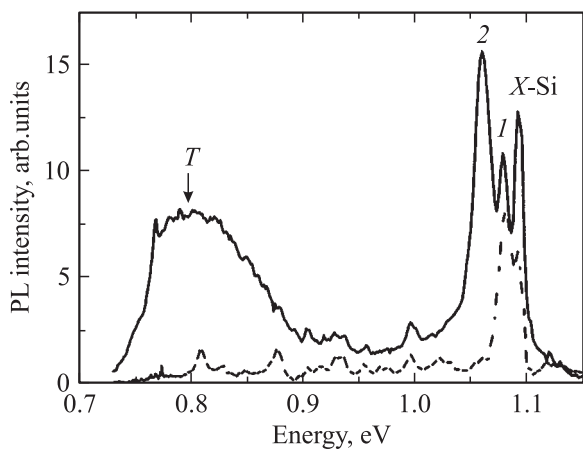


Рис. 2. Спектры ФЛ структуры с КТ Si/Ge/SiO₂/Si (сплошная линия) и структуры Si/SiO₂/Si (штриховая линия), измеренные при 5 К.

окисления поверхности Si, наблюдаются две линии с энергиями максимума $h\nu = 0.94$ и 1.02 eV, обусловленные рекомбинацией экситонов в смачивающем слое. В спектрах ФЛ структуры с КТ, сформированными на окисленной поверхности Si, этих линий нет, что хорошо согласуется с данными, полученными методом дифракции быстрых электронов в процессе роста структуры [4], свидетельствующими об отсутствии смачивающего слоя. При повышении температуры измерения линия T в спектрах ФЛ структуры с КТ, сформированными на неокисленной поверхности Si, распадается на две линии с $h\nu_A = 0.779$ eV (линия A) и $h\nu_B = 0.829$ eV (линия B), как это показано на рис. 3. Аппроксимировав спектры двумя линиями гауссовой формы, мы построили температурные зависимости интегральной интенсивности линий A и B , приведенные на рис. 4. Энергии активации температурного гашения составляют $E_A = 126$ meV для линии A и $E_B = 66$ meV для линии B . Отметим, что энергия активации гашения линий ФЛ КТ со значени-

ями, близкими к нашим данным, наблюдались ранее в работе [8].

Изменение формы линии T в спектрах ФЛ структуры с КТ, сформированными на окисленной поверхности Si, при повышении температуры позволяет предполагать, что она также является суммой двух линий. Однако мы не смогли провести ее разделения на составляющие компоненты из-за появления в спектрах ФЛ при повышенных температурах интенсивных линий с энергиями $h\nu = 0.76$ и 0.74 eV, связанных с рекомбинацией через уровни дефектов в кремнии с участием кислорода [7,9,10]. Энергия активации температурного гашения для линии T (E_T) в структуре с КТ на окисленной поверхности Si составляет 160 meV.

Разности энергий максимумов линий A и B (50 meV) и энергий активации их температурного гашения (60 meV) близки. Это позволяет предполагать, что линии связаны с рекомбинацией экситонов в КТ различного размера и, следовательно, размер КТ в исследуемой структуре имеет бимодальное распределение.

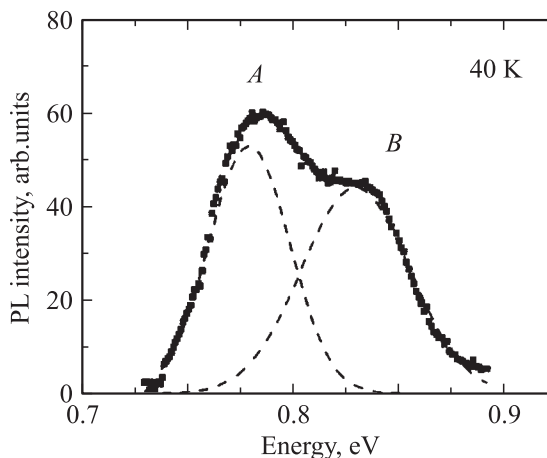


Рис. 3. Аппроксимация спектра ФЛ структуры с КТ Si/Ge/Si двумя линиями гауссовой формы.

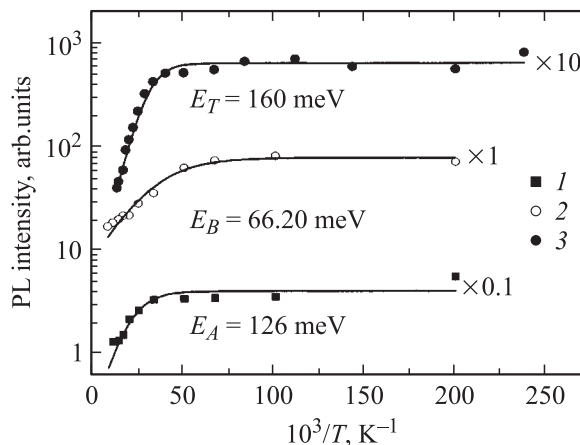


Рис. 4. Температурная зависимость интегральной интенсивности линий A (1) и B (2) в структуре с КТ Si/Ge/Si и линии T в структуре с КТ Si/Ge/SiO₂/Si (3).

Считается, что температурное гашение ФЛ в КТ Si/Ge/Si обусловлено выбросом носителей заряда с уровней размерного квантования дырок в матрицу [8]. В этом случае энергия активации гашения ФЛ должна быть равна энергии локализации дырки в КТ. Закон сохранения энергии требует, чтобы сумма энергии локализации дырки и энергии максимума линии ФЛ в КТ была равна ширине запрещенной зоны матрицы Si (1.17 eV) за вычетом энергии локализации электрона и энергии связи экситона в КТ. Однако легко заметить, что ни для одной из наблюдаемых линий это условие не выполняется. Более того, характерные энергии локализации дырок, рассчитанные для КТ Ge/Si, составляют 300–400 meV [11], что согласуется с энергетическим положением линии T в спектрах ФЛ обеих структур (Si/Ge/Si и Si/Ge/SiO₂/Si)¹ и заметно отличается от полученных нами значений энергии активации гашения ФЛ КТ. Мы полагаем, что отличие энергии активации гашения линий ФЛ КТ и расчетных энергий локализации дырок связано с тем, что при повышении температуры дырки с уровней размерного квантования в КТ переходят не в валентную зону кремния, а попадают на уровни некоторого локализованного в окрестности КТ дефекта. В этом случае разность энергии активации гашения ФЛ и энергии локализации дырок на уровнях размерного квантования равна энергии залегания уровня дефекта, которая составляет примерно 200 meV. Небольшое различие в энергиях активации гашения ФЛ КТ Si/Ge/Si и Si/Ge/SiO₂/Si может быть связано с тем, что добавление кислорода в Si приводит к изменению энергии залегания уровня дефекта. В рамках этой модели получение бездефектной матрицы Si должно резко увеличивать энергию активации гашения ФЛ КТ. Это действительно наблюдалось авторами работы [12], которые сообщают об интенсивности ФЛ КТ при комнатной температуре, что соответствует энергии активации порядка 300–400 meV.

Таким образом, в настоящей работе изучена ФЛ КТ в системах Si/Ge/Si и Si/Ge/SiO₂/Si. Показано, что в спектрах ФЛ КТ Si/Ge/SiO₂/Si отсутствуют линии рекомбинации экситонов в смачивающем слое. Обнаружено, что энергия активации термического гашения ФЛ КТ на несколько сотен meV меньше энергии локализации дырок в КТ. Полученные результаты объяснены термоактивированным захватом дырок на уровни дефектов, локализованных в окрестности КТ.

Список литературы

- [1] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. *ФТП* **34**, 1281 (2000).
- [2] А.И. Якимов, В.А. Марков, А.В. Двуреченский, О.П. Пчеляков. *Письма в ЖЭТФ* **63**, 423 (1996).

- [3] Т.М. Бурбаев, Т.Н. Заварицкая, В.А. Курбатов, Н.Н. Мельник, В.А. Цветков, К.С. Журавлев, В.А. Марков, А.И. Никифоров. *ФТП* **35**, 979 (2001).
- [4] А.И. Никифоров, В.В. Ульянов, О.П. Пчеляков, С.А. Тийс, А.К. Гутаковский. *ФТТ* **46**, 80 (2004).
- [5] А.А. Shklyayev, M. Ichikawa. *Surf. Sci.* **514**, 19 (2002).
- [6] А.Г. Милехин, А.И. Никифоров, М.Ю. Ладанов, О.П. Пчеляков, Ш. Шульце, Д.Р.Т. Цан. *ФТТ* **46**, 94 (2004).
- [7] G. Davies. *Phys. Rep.* **176**, 83 (1989).
- [8] J. Wan, Y.H. Luo, Z.M. Jiang, G. Jin, J.L. Liu, Kang L. Wang. *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1980 (2001).
- [9] J. Wagner, A. Dornen, R. Sauer. *Phys. Rev. B* **31**, 5561 (1985).
- [10] A. Dornen, G. Pensl, R. Sauer. *Phys. Rev. B* **35**, 9318 (1987).
- [11] А.В. Двуреченский, А.В. Ненашев, А.И. Якимов. *Изв. РАН. Сер. физ.* **66**, 156 (2002).
- [12] G.E. Cirlin, V.G. Talalaev, N.D. Zakharov, N.D. Zakharov, V.A. Egorov, P. Werner. *Phys. Stat. Sol. (b)* **232**, R 1 (2002).

¹ Поскольку энергии связи экситона и локализации электрона на КТ много меньше энергии локализации дырок, основная доля разницы между шириной запрещенной зоны и положением линии рекомбинации КТ (1170–800 meV = 370 meV) приходится на энергию локализации дырки в КТ.