

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ge/Si ПРИ ЭПИТАКСИИ ИЗ ИОННО-МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ

А.В. Мудрый¹⁾, В.Д. Живулько¹⁾, В.А. Зиновьев²⁾, А.Ф. Зиновьева²⁾,
Ж.В. Смагина²⁾, А.В. Двуреченский²⁾

¹⁾Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по материаловедению, Минск 220072, Беларусь, vad.zhiv@gmail.com

²⁾Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН,
Новосибирск 630090, Россия

Исследована фотолюминесценция наноструктур Ge/Si с квантовыми точками (КТ) Ge, созданными при молекулярно-лучевой эпитаксии в условиях частичной ионизации пучков Ge⁺. Обнаружено, что воздействие ионов Ge⁺, ускоренных напряжением до ~ 2 кВ в процессе ионно-молекулярной эпитаксии, приводит к модификации КТ Ge в многослойных наноструктурах Ge/Si. Установлено, что имплантация ионов Ge⁺ в процессе осаждения КТ Ge, приводит к образованию дефектов структуры на границах раздела нанослоев Ge и Si, обуславливающих увеличение интенсивности полос фотолюминесценции в спектральной области ~ 0.7 – 0.9 эВ. Обсуждается механизм излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда в наноструктурах Ge/Si с КТ Ge.

Ключевые слова: наноструктуры; молекулярно-лучевая эпитаксия; облучение; фотолюминесценция.

PHOTOLUMINESCENCE OF Ge/Si QUANTUM DOTS AT EPITAXY FROM ION-MOLECULAR BEAMS

A.V. Mudryi¹⁾, V.D. Zhivulko¹⁾, V.A. Zinovyev²⁾, A.F. Zinovieva²⁾,
Zh.V. Smagina²⁾, A.V. Dvurechenskii²⁾

¹⁾Scientific-Practical Material Research Centre of the National Academy of Science of Belarus,
220072 Minsk, Belarus, vad.zhiv@gmail.com

²⁾Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

The photoluminescence of Ge/Si nanostructures with Ge quantum dots (QDs) produced by molecular beam epitaxy under conditions of partial ionization of Ge⁺ beams have been studied. It was found that the action of Ge⁺ ions that are accelerated by voltages to ~ 2 kV during ion-molecular epitaxy leads to the modification of Ge QDs in multilayer Ge/Si nanostructures. It was determined that the implantation of Ge⁺ ions during the deposition of Ge quantum dots leads to the formation of structural defects at the interfaces between the Ge and Si nanolayers, which causes an increase in the intensity of the photoluminescence bands in the spectral region of 0.6 ~ 0.8 eV. The mechanism of radiative recombination of nonequilibrium charge carriers of Ge/Si nanostructures with QDs of Ge has been discussed.

Keywords: nanostructure; molecular beam epitaxy; irradiation; photoluminescence.

Введение

Создание наноструктур Ge/Si с КТ Ge методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) является одним из приоритетных направлений для полупроводниковой оптоэлектроники и нанофотоники [1-4]. В последние годы была продемонстрирована возможность реализации на их основе высокоэффективных светодиодов, лазеров и фотоприемников для инфракрасной области спектра 1.1-5.0 мкм [2, 4].

Установлено, что увеличение интенсивности электро- и фотолюминесценции наноструктур Ge/Si при комнатной температуре может быть достигнуто при имплантации ионов Ge в процессе зарождения КТ Ge при эпитаксиальном росте [2, 5]. В настоящей работе приведены данные по исследованию фотолюминесценции наноструктур Ge/Si с КТ Ge, созданных из ионно-молекулярных пучков и обычном эпитаксиальном росте.

Материалы и методы

Исследовались наноструктуры Ge/Si с КТ Ge созданными методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках монокристаллического Si p-типа проводимости. Наноструктура состояла из 10 чередующихся нанослоев Si и Ge сформированных при температурах $\sim 500\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$ на подложке Si на буферном слое Si $\sim 100\text{ нм}$ осажденном методом МЛЭ. Основная область наноструктуры включала восемь чередующихся слоев: Ge $\sim 5.5\text{ МС}$ ($1\text{ МС} \sim 1.41\text{ \AA}$) осажденных при $T \sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ и Si $\sim 15\text{ нм}$ при $T \sim 600\text{ }^\circ\text{C}$. Затем наноструктура Ge/Si закрывалась слоем Si с толщиной $\sim 25\text{ нм}$ при $T \sim 600\text{ }^\circ\text{C}$, образец 1. Для образца 2 формирование слоев Ge проводилось в процессе ионно-молекулярной эпитаксии при воздействии ионов Ge^+ , ускоренных напряжением до $\sim 2\text{ кВ}$. Эти сравнительные эксперименты позволили выявить влияние воздействия ионов Ge^+ на люминесцентные характеристики наноструктур Ge/Si с КТ Ge. Измерение спектров фотолюминесценции (ФЛ) проводилось по методике [5].

Результаты и их обсуждение

Как видно из рисунка 1, для образцов 1 и 2 при температуре $T \sim 4.2\text{ К}$ в спектрах ФЛ в области энергий $> 1.03\text{ эВ}$ присутствует полоса $\text{BE}_{\text{TO}} \sim 1.092\text{ эВ}$, обусловленная излучательной рекомбинацией экситонов, связанных на атомах бора, как основной легирующей примеси в Si p-типа проводимости. При этом излучательная рекомбинация локализованных экситонов происходит с участием поперечных оптических фононов с энергией $\text{TO} \sim 58\text{ мэВ}$. При $T \sim 78\text{ К}$ в спектрах ФЛ наблюдается полоса $\text{FE}_{\text{TO}} \sim 1.1\text{ эВ}$, обусловленная рекомбинацией свободных экситонов с участием TO фононов, а при $T \sim 300\text{ К}$ полоса $\text{BB} \sim 1.08\text{ эВ}$ отнесена к межзонным оптическим переходам при рекомбинации электронов и дырок в подложке и слоях Si в наноструктурах Ge/Si с КТ Ge, рисунок 1. Как видно на рисунке 1

в диапазоне температур от 4.2 до 300 К в спектрах ФЛ в области энергий $< 0.9\text{ эВ}$ присутствует полоса $\text{QD1} \sim 0,76\text{ эВ}$, которая может быть отнесена к излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда на КТ Ge в наноструктурах Ge/Si.

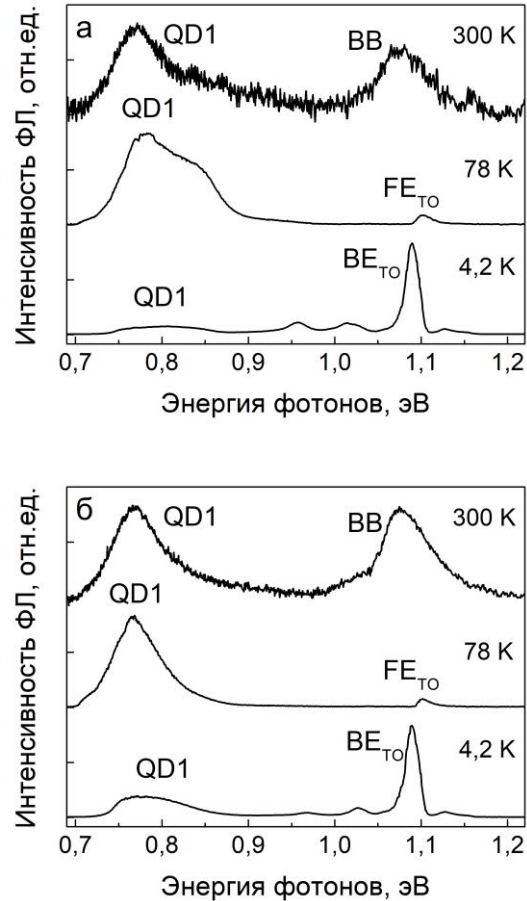


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции наноструктур Ge/Si с КТ Ge: а – без облучения, образец 1; б – с облучением ионами Ge^+ , образец 2

Сравнительный анализ показал, что для образца 2, облученного ионами Ge^+ в процессе МЛЭ, характерна более высокая интенсивность полосы QD1 в 3-4 раза, смещение в область низких энергий и изменение спектральной формы по сравнению с аналогичными оптическими характеристиками для образца 1. Для определения механизмов излучательной рекомбинации при $T \sim 78\text{ К}$ измерены спектры ФЛ для различных плотностей мощности лазерного излучения в диапазоне $0.21\text{--}4\text{ Вт/см}^2$ (рис. 2).

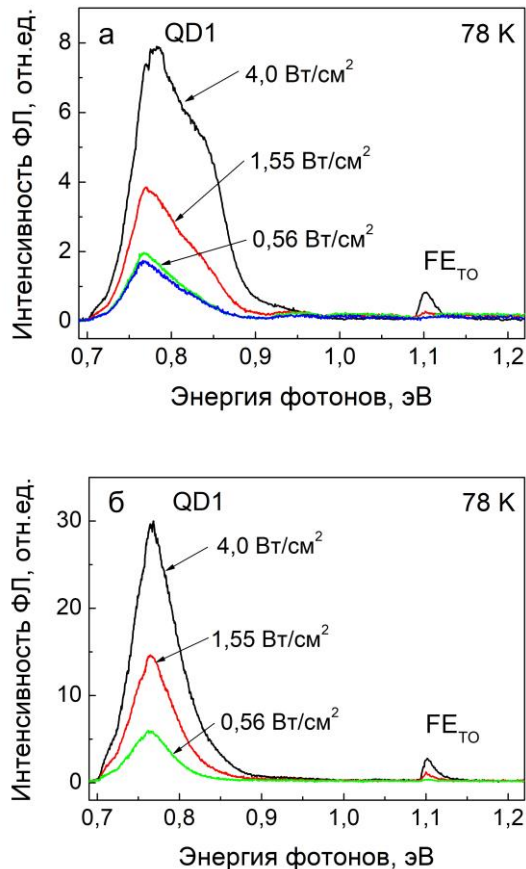


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции наноструктур Ge/Si с КТ Ge при различных интенсивностях лазерного возбуждения: а – без облучения, образец 1; б – с облучением ионами Ge⁺, образец 2

Коэффициент j (смещение максимума полосы на порядок изменения плотности мощности лазерного излучения) полосы QD1 для образцов 1 и 2 составил 17 мЭВ и 4 мЭВ, соответственно. Для образцов 1 и 2 установлено, что зависимость интенсивности полос QD1 от мощности возбуждения описывается формулой $I(P) = P^k$, где $k \sim 0.75$ (образец 1) и 0.83 (образец 2). Более низкое значение коэффициента j , высокая интенсивность полосы QD1 и увеличение численного значения коэффициента k свидетельствуют об улучшении структуры КТ Ge в образце 2. Анализ оптических характеристик обоих типов наноструктур Ge/Si с КТ Ge указывает на преимущество использования частично ионизированных пучков ионов Ge⁺ в процессе зарождения КТ Ge. Увеличение интенсивности полосы ФЛ может быть объ-

яснено эффектом аморфизации осаждаемых КТ Ge в процессе их роста при воздействии ионов Ge⁺ с частичной ионизацией молекулярных пучков и температуре ~ 500 °С и последующей их рекристаллизации при температуре ~ 600 °С для формирования закрывающих слоев Si в наноструктурах Ge/Si с КТ Ge. Предполагается, что полоса QD1 ~ 0.76 эВ обусловлена излучательной рекомбинацией электронов, локализованных в Si, и дырок, локализованных в КТ Ge.

Заключение

Воздействие ионно-молекулярных пучков в процессе эпитаксиального роста КТ Ge в наноструктурах Ge/Si приводит к модификации границ раздела Si-Ge и образованию дефектов структуры значительно увеличивающих интенсивность полос фотолуминесценции в инфракрасной спектральной области 0.7 – 0.8 эВ (~ 1.6 мкм), что необходимо для повышения эффективности светодиодов и развития кремниевой оптоэлектроники и нанофотоники.

Работа выполнена по ГПНИ «8. Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 2.2.1.

Библиографические ссылки

1. Dvurechenskii A. et al. Photoluminescence from ordered Ge/Si quantum dot group grown on the strain-patterned substrates. *Phys. Stat. Sol. C*. 2017; 2: 1700187 (6pp.)
2. Grydlik M. et al. Lasing from glassy Ge quantum dots in crystalline Si. *ACS Photonics* 2016; 3: 298-303.
3. Zinovieva A. F. et al. Photoluminescence of compact GeSi quantum dots groups with increased probability of finding an electron in Ge. *Scientific Reports* 2020; 10: 9308 (9 pp.).
4. Yakimov A., Kirienko V., Bloshkin A., Dvurechenskii A., Utkin D. Quantum dot based mid-infrared photodetector enhanced by a hybrid metal-dielectric optical antenna. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020; 53: 335105 (7 pp.).
5. Zinoviyev V. A. et al. Si-based light emitters synthesized with Ge⁺ ion bombardment. *J. Appl. Phys.* 2021; 130: 153101 (8 pp.)