

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПЛАНТАЦИИ Ge^+ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ НАНОСТРУКТУР Ge/Si С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ Ge

В. Д. Живулько¹, А. В. Мудрый¹, О. М. Бородавченко¹, И. Д. Мялик¹,
В. А. Зиновьев², А. Ф. Зиновьева², Ж. В. Смагина², А. В. Двуреченский²

¹⁾ Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: borodavchenko@physics.by

²⁾ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
ул. Академика Лаврентьева, 13, 630090 Новосибирск, Россия, e-mail: zinoviev@isp.nsc.ru

На основании температурной зависимости спектров фотолюминесценции в диапазоне $\sim 5\text{--}300\text{ K}$ проведен сравнительный анализ люминесцентных характеристик наноструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge , созданными в процессе эпитаксиального роста с применением имплантации ионов Ge^+ и без нее. Установлены основные механизмы рекомбинации и определены значения энергии активации электронных состояний, участвующих в оптических переходах.

Ключевые слова: кремний; германий; ионная имплантация; фотолюминесценция.

STUDY OF THE INFLUENCE OF Ge^+ IMPLANTATION ON OPTICAL CHARACTERISTICS OF Ge/Si LIGHT-EMISSING NANOSTRUCTURES WITH Ge QUANTUM DOTS

V. D. Zhivulko¹, A. V. Mudryi¹, O. M. Borodavchenko¹, I. D. Myalik¹,
V. A. Zinovyev², A. F. Zinovieva², Zh. V. Smagina², A. V. Dvurechenskiy²

¹⁾ Scientific-Practical Material Research Centre of the National Academy of Science of Belarus,
P. Brovki str. 19, 220072 Minsk, Belarus

²⁾ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS,
Akademika Lavrentieva str. 13, 630090 Novosibirsk, Russia
Corresponding author: O. M. Borodavchenko (borodavchenko@physics.by)

Based on the temperature dependence of the photoluminescence spectra in the range of $\sim 5\text{--}300\text{ K}$ a comparative analysis of the luminescent characteristics of Ge/Si nanostructures with Ge quantum dots created using Ge^+ ion implantation during epitaxial growth and without it was carried out. The main mechanisms of recombination and the values of the activation energy of the electronic states involved in optical transitions have been established.

Key words: silicon; germanium; ion implantation; photoluminescence.

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные квантово-размерные эффекты, связанные с зависимостью энергетических состояний от размера системы, обуславливают интерес научного сообщества к наноструктурам с квантовыми точками. Варьируя размер квантовой точки, посредством влияния на процессы ее формирования и последующей обработки, можно изменить спектр ее экситонных, электронных и фононных состояний, и таким образом достигать необходимых характеристик для конкретных практических приложений

[1, 2]. В частности, перспективной является возможность создания светодиодов для ближней и инфракрасной области спектра 1,3–1,6 мкм на основе полупроводниковых наноструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge [3]. Наиболее важным при этом является трехмерное упорядочение квантовых точек в плоскости роста и уменьшение их разброса по размерам $\sim 1\text{--}10$ нм. Процесс роста управляется толщинами наносимых нанослоев Ge от 3 до 20 МС (1 МС $\sim 1,41$ Å) и Si $\sim 3\text{--}20$ нм, а также температурой их формирования в диапазоне 500–730 °С. Наличие деформаций в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками Ge приводит к изменению энергетической структуры и относительно высокой люминесценции от квантовых точек Ge в спектральной области $\sim 1,55$ мкм, что важно для создания высокоэффективных светодиодов.

Ранее было установлено, что имплантация низкоэнергетических ионов Ge^+ $\sim 2\text{--}2,5$ кэВ в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии квантовых точек Ge в наноструктурах Si/Ge увеличивает интенсивность фотолюминесценции в инфракрасной области спектра за счет участия в процессах излучательной рекомбинации точечных дефектов структуры, а именно расщепленных в направлении [110] междоузельных атомов Ge [4, 5].

Однако, несмотря на достигнутые результаты, современные научные публикации не содержат подробной информации о фундаментальных оптических характеристиках наноструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge. В данной работе представлены новые результаты по температурной зависимости спектров фотолюминесценции наноструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge в широком диапазоне температур $\sim 5\text{--}300$ К.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводились на двух типах наноструктур Ge/Si с квантовыми точками (КТ) Ge, созданными методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевых подложках с ориентацией (001), легированных бором (КДБ-100). После снятия окисного слоя с поверхности подложки на нее осаждался буферный слой Si толщиной ~ 100 нм. Следующим при ~ 500 °С формировался слой Ge толщиной $\sim 5,5$ МС (1 МС = 1,41 Å), который закрывался слоем Si ~ 15 нм при ~ 600 °С. Таким образом, готовые наноструктуры Ge/Si содержали десять слоев Ge, разделенных слоями Si. Закрывающий слой Si с толщиной 40 нм формировался при ~ 600 °С (образец 1). Создание образцов второго типа осуществлялось описанным выше методом, однако дополнительно во время осаждения нанослоев Ge проводилась имплантация ионов Ge^+ с энергией ~ 2 кэВ (образец 2).

Регистрация спектров фотолюминесценции (ФЛ) наноструктур Ge/Si проводилась на спектроскопическом комплексе на базе дифракционного монохроматора МДР-23У, обеспечивающего обратную линейную дисперсию 26 Å/мм. В качестве источника возбуждающего излучения использовался твердотельный лазер, работающий на длине волны 532 нм с мощностью до 200 мВт. Оптические сигналы детектировались охлаждаемым до температуры ~ 80 К Ge *p-i-n*-детектором типа ЕО-817Н. Температурные измерения в диапазоне $\sim 5\text{--}300$ К осуществлялись с использованием специального оптического криостата модели ARS CS202E-DMX.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены спектры ФЛ, зарегистрированные при температуре ~ 5 К, наноструктур Ge/Si с КТ Ge, созданных без дополнительного облучения (образец 1) и с применением имплантации ионов Ge^+ (образец 2). Зависимость спектров ФЛ образца 1 в диапазоне температур от ~ 5 К до комнатной ~ 300 К представлена на рис. 2 в качестве примера в полулогарифмическом масштабе.

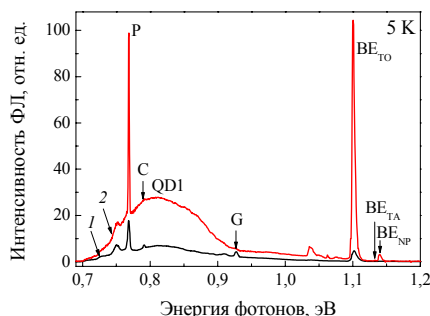


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции наноструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge, созданных без дополнительной имплантации (1) и с имплантацией ионов Ge^+ (2)

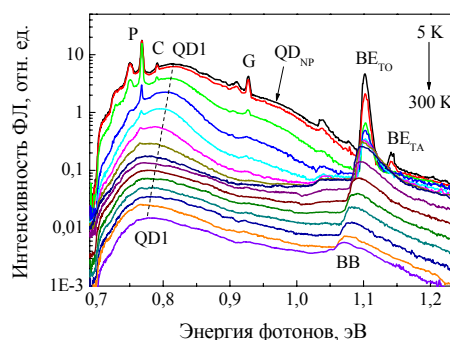


Рис. 2. Температурная зависимость спектров фотолюминесценции наноструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge

Высокоэнергетическая область $> 1,02$ эВ спектров ФЛ характеризуется наличием линий $\text{BE}_{\text{TO}} \sim 1,092$ эВ и $\text{BE}_{\text{TA}} \sim 1,132$ эВ, обусловленных аннигиляцией связанных экситонов с одновременным участием поперечных оптических фононов с энергией $\text{TO} \sim 58$ мэВ и акустических фононов с энергией $\text{TA} \sim 18$ мэВ, соответственно. Узкая линия $\text{BE}_{\text{NP}} \sim 1,150$ эВ относится к бесфононной излучательной аннигиляции экситонов, связанных на атомах бора, как основной легирующей примеси в подложке Si.

С ростом температуры, вместе с гашением экситонных линий, происходит перераспределение каналов излучательной рекомбинации, и при комнатной температуре ~ 300 К полоса BB в области $\sim 1,08$ эВ соответствует межзонным оптическим переходам, рис. 2.

Полоса QD1 $\sim 0,81$ эВ относится к «квазипрямой» излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда, а именно электронов в Si и дырок в КТ Ge, о чем свидетельствует смещение полосы приблизительно на 25 мэВ в низкоэнергетическую область с ростом температуры от ~ 5 К до 300 К, рис. 2 [1, 6, 7]. Полоса $\text{QD}_{\text{NP}} \sim 0,95$ эВ обусловлена непрямой излучательной рекомбинацией электронов, локализованных в Si, с дырками, локализованными в КТ Ge.

Следует отметить, что в спектрах ФЛ образца 2, дополнительно имплантированного ионами Ge^+ в процессе эпитаксиального роста КТ Ge, наблюдается значительное увеличение интенсивности полосы QD1 приблизительно в четыре раза по сравнению с не облученным образцом 1, рис. 1. Однако из-за образования дефектов структуры полуширина полосы QD1 увеличивается и ее максимум на 7 мэВ смещается в высокоэнергетическую область $\sim 0,817$ эВ.

Также в спектрах ФЛ наноструктур Ge/Si с КТ Ge присутствуют узкие линии $G \sim 0,928$ эВ, $C \sim 0,791$ эВ и $P \sim 0,768$ эВ, обусловленные излучательной рекомбинацией локализованных экситонов в подложке Si, на термически индуцированных дефектах, содержащих остаточные примесные атомы кислорода и углерода. С повышением температуры при > 78 К указанные линии не разрешаются.

Ранее был проведен анализ зависимости спектров ФЛ наноструктур Ge/Si с КТ Ge от плотности мощности лазерного излучения P , в результате которого было обнаружено, что для образца 1, не имплантированного ионами Ge^+ , при увеличении P в диапазоне $0,05\text{--}4,00$ Вт/см² максимум полосы QD1 $\sim 0,81$ смещается в высокоэнергетическую область на $\sim 12\text{--}15$ мэВ [8]. Этот эффект свидетельствует о значительном разбросе энергетических уровней, участвующих в процессах излучательной рекомбинации, т.е. подтверждает наличие флуктуаций электростатического потенциала на границе раздела между слоями Si и Ge в исследуемых наноструктурах. С другой стороны, в наноструктурах Ge/Si, имплантированных ионами Ge^+ , не наблюдается смещения максимума полосы QD1 в диапазоне $P \sim 0,05\text{--}4,00$ Вт/см². Это свидетельствует о том, что ионно-имплантированные дефекты, возникшие при эпитаксиальном росте КТ Ge при температуре ~ 500 °С и последующей их кристаллизации в процессе формирования разделительных слоев Si с толщиной 15 нм при ~ 600 °С, значительно снижают величину флуктуаций электростатического потенциала на границе КТ Ge с разделительными слоями Si. Наблюдаемые эффекты позволяют предположить, что имплантация ионов Ge^+ во время эпитаксиального роста КТ Ge приводит к снижению концентрации дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации.

Температурная зависимость интегральной интенсивности полосы QD1 наноструктур Ge/Si с КТ Ge определялась с помощью обработки экспериментальных данных (рис. 2) следующим выражением:

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + a_1 \exp\left(-\frac{E_{a1}}{kT}\right) + a_2 \exp\left(-\frac{E_{a2}}{kT}\right)},$$

где I_0 – интегральная интенсивность ФЛ, a_1, a_2 – подгоночные параметры, k – постоянная Больцмана, E_{a1}, E_{a2} – энергия активации.

Определенные энергии активации температурного гашения полосы QD1 составили $E_{a1} \sim 47,1$ мэВ, $E_{a2} \sim 7,4$ мэВ и $E_{a1} \sim 72,7$ мэВ, $E_{a2} \sim 14,9$ мэВ для образцов 1 и 2, соответственно. Более высокое значение энергии активации $E_{a1} \sim 72,7$ мэВ для имплантированного ионами Ge^+ образца 2, по сравнению со значением $E_{a1} \sim 47,1$ мэВ для не имплантированного образца 1 может быть объяснено большей величиной дефектов в многослойной наноструктуре Si/Ge с КТ Ge.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что дополнительная имплантация ионов Ge^+ при зарождении квантовых точек Ge в многослойных наноструктурах Ge/Si способствует ~ 4 -кратному увеличению интенсивности фотолюминесценции при криогенных температурах $\sim 5\text{--}78$ К по сравнению с образцами, созданными без нее. На основании анализа температурной зависимости спектров фотолюминесценции наноструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge установлены основные механизмы излучательной рекомбинации, происходящие в материале такого типа. Полоса QD1 с максимумом в области энергий $\sim 0,81$ эВ отно-

сится к «квазипрямой» излучательной рекомбинации электронов в Si и дырок, локализованных в квантовых точках Ge. Энергии активации температурного гашения полосы QD1 составили $E_{a1} \sim 47,1$ мэВ, $E_{a2} \sim 7,4$ мэВ и $E_{a1} \sim 72,7$ мэВ, $E_{a2} \sim 14,9$ мэВ для образцов, созданных без имплантации и с имплантацией ионов Ge^+ в процессе эпитаксиального роста, соответственно.

Работа выполнена по проекту ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»)), задание 2.2.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Brehm M. Site-controlled and advanced epitaxial Ge/Si quantum dots: fabrication, properties, and applications / M. Brehm, M. Grydlik // Nanotechnology. – 2017. – Vol. 28. – P. 392001-1–392001-22.
2. Photoluminescence of compact GeSi quantum dot groups with increased probability of finding an electron in Ge / A. F. Zinovieva [et al.] // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – P. 9308-1–9308-8.
3. Near-infrared photoresponse in Ge/Si quantum dots enhanced by localized surface plasmons supported by aluminium nanodiscs / A. I. Yakimov [et al.] // J. Appl. Phys. – 2020. – Vol. 128, № 14. – P. 143101-1–143101-9.
4. Lasing from glassy quantum dots in crystalline Si / M. Grydlik [et al.] // ACS Photonics. – 2016. – Vol. 3. – P. 298–303.
5. Laser Level Scheme of Self-Interstitials in Epitaxial Ge Dots Encapsulated in Si / M. Grydlik [et al.] // Nano Letters. – 2016. – Vol. 3. – P. 6802–6807.
6. Nucleation and epitaxial growth of Ge nanoislands on Si surface pre-patterned by ion irradiation / J.V. Smagina [et. al.] // Phys. Status Solidi A. – 2013. – Vol. 210, № 8. – P. 1522–1524.
7. Light-emitting tunneling nanostructures based on quantum dots in Si and GaAs / V. G. Talalaev [et. al.] // Semiconductors. – 2012. V. 46, № 11. – P. 1460–1470.
8. Фотолюминесценция наноструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge / Мудрый А. В. [и др.] // Материалы и структуры современной электроники: материалы X Международной научной конференции, Минск, 12–14 октября 2022 г. – Минск: БГУ, 2022. – С. 471–476.

ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР СЕРЕБРА НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ ГЕРМАНИЯ

А. Д. Замковец¹, Л. В. Баран², А. С. Кузьмицкая³,
В. В. Малютина-Бронская³, И. Ю. Фролов³

¹⁾ Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости, 68, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: a.zamkovets@dragon.bas-net.by

²⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: brlv@mail.ru

³⁾ ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», пр. Независимости, 68-1,
220072 Минск, Беларусь, e-mail: malyutina@oelt.basnet.by

С использованием спектроскопии зеркального отражения установлено, что контактирование наночастиц серебра со средним размером 100 нм с подложкой из монокристаллического германия для оптических применений приводит к уменьшению выраженности полосы поверхностного плазмонного резонанса и смещению ее максимума в длинноволновую область спектра относительно ее расположения на стекле. Это связано с поглощением германием излучения видимого диапазона и с высоким