

3. GraphAne: From Synthesis to Applications / Sahin H., Leenaerts O., Singh S. K., Peeter F. M. // *Materials Science*. – 2015. – P. 1 – 15.
4. Ab-initio simulations of deformation potentials and electron mobility in chemically modified graphene and two dimensional hexagonal boron-nitride / Bruzzone S., Fiori G. // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – V. 99. – P. 22108.
5. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials / Giannozzi P., Baroni S., Bonini N., Calandra M., Car R., Cavazzoni C., Ceresoli D., Chiarotti G. L., Cococcioni M., Dabo I. et al // *J.Phys.: Condens. Matter*. – 2009. – V.21, P. 395502.
6. EPW: Electron–phonon coupling, transport and superconducting properties using maximally localized Wannier functions / Ponc  S., Margine E. R., Verdi C. // *Computer Physics Communications*. – 2016. – V. 209. – P. 116 – 133.
7. Определение интенсивностей рассеивания электронов в одиночном слое графена / В.В. Муравьев, В.Н. Мищенко // *Доклады БГУИР*. – 2017. № 6 (108). — С. 128—129.

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОСТРУКТУР Ge/Si С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ Ge

**А. В. Мудрый¹, В. Д. Живулько¹, О. М. Бородавченко¹, А. В. Гацак¹,
В. А. Зиновьев², Ж. В. Смагина², А. Ф. Зиновьева², А. В. Двуреченский²**

¹⁾ *Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь; e-mail: mudryi@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*

При температуре 4,2 К исследована фотолюминесценция многослойных наноструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge, созданными при обычной молекулярно-лучевой эпитаксии и эпитаксии из ионно-молекулярных пучков Ge⁺. Установлено, что облучение ионами Ge⁺ в процессе зарождения nanoостровков Ge на Si приводит к увеличению интенсивности полосы фотолюминесценции в области энергии ~ 0,81 эВ и стабилизации ее спектрального положения. Обсуждается возможный механизм излучательной рекомбинации носителей заряда в наноструктурах Ge/Si с квантовыми точками Ge.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия; наноструктуры Ge/Si; квантовые точки Ge; фотолюминесценция

PHOTOLUMINESCENCE OF Ge/Si NANOSTRUCTURES WITH Ge QUANTUM DOTS

**A. V. Mudryi¹, V. D. Zhivulko¹, O. M. Borodavchenko¹, A. V. Hatsak¹,
V. A. Zinoviyev², Zh. V. Smagina², A. F. Zinovieva², A. V. Dvurechenskii²**

¹⁾ *Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²⁾ *Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russia*

Corresponding author: V. D. Zhivulko (zhivulko@physics.by)

The photoluminescence of multilayer Ge/Si nanostructures with Ge quantum dots produced by conventional molecular-beam epitaxy and epitaxy from Ge⁺ ion-molecular beams

was been studied at a temperature 4.2 K. It has been found that the irradiation with Ge^+ ions during the nucleation of Ge nanoislands on Si leads to an increase in the intensity of the photoluminescence band in the energy region ~ 0.81 eV and stabilization of its spectral position. A possible mechanism of radiative recombination of charge carriers in Ge/Si nanostructures with Ge quantum dots is discussed.

Key words: molecular-beam epitaxy; Ge/Si nanostructures; Ge quantum dots; photoluminescence.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие полупроводниковой оптоэлектроники на основе наноструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge (КТ Ge), создаваемых на монокристаллическом Si с использованием метода молекулярно-лучевой эпитаксии, вызывает повышенный интерес исследователей благодаря их уникальным физическим характеристикам и возможности создания светоизлучающих наноструктур и фотоприемников для ближней инфракрасной области спектра 1–5 мкм [1–3]. Недавно было показано, что низкоэнергетическое (≤ 3 кэВ) облучение ионами Ge^+ при молекулярно-лучевой эпитаксии КТ Ge на Si приводит к увеличению их плотности, уменьшению средних размеров и дисперсии по размерам в сравнении с наноструктурами Ge/Si с КТ Ge, создаваемыми без облучения ионами Ge^+ [1, 4]. Установлено, что ионное облучение в процессе эпитаксии увеличивает интенсивность фотолуминесценции от nanoостровков Ge в инфракрасной области спектра $\sim 1,3$ – $1,6$ мкм за счет образования точечных дефектов структуры (расщепленных в направлении [110] междоузельных атомов Ge) [1]. Особо значимой является технология наноимприт-литографии, позволяющая с использованием ионных пучков Ge^+ создавать упорядоченные nanoостровки Ge, которые являются основой зарождения КТ Ge при последующей молекулярно-лучевой эпитаксии [5]. Поэтому значительный интерес представляет установление природы дефектов структуры, образуемых при воздействии низкоэнергетических ионов Ge^+ в области границы раздела в наноструктурах Ge/Si, а также определение механизмов излучательной рекомбинации носителей заряда в области интерфейса КТ Ge/Si.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на двух типах наноструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge (КТ Ge), созданными методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках Si с ориентацией (001), легированных бором (КДБ-100). На первой стадии проводилось снятие окисного слоя с поверхности Si подложки с использованием ионного распыления. Буферный слой Si с толщиной ~ 100 нм осаждался при повышенной температуре методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Затем на буферном слое Si при температуре $T \sim 500$ °C формировался слой Ge с толщиной $\sim 5,5$ МС (1 МС = $1,41$ Å), который закрывался при температуре 600 °C слоем Si с толщиной 15 нм. В наноструктурах Ge/Si создавалось десять слоев Ge, разделенных слоями Si. Затем при повышенной температуре $T \sim 600$ °C формировался закрывающий слой Si с толщиной 40 нм (образец 1). Второй тип образцов создавался аналогичным способом, только во время осаждения нанослоев Ge дополнительно проводилась имплантация ионов Ge^+ с низкой энергией ~ 2 кэВ (образец 2). Измерение спектров фотолуминесценции (ФЛ) наноструктур Ge/Si проводилось при температуре жидкого гелия $\sim 4,2$ К в специальном оптическом криостате. Для возбуждения люминесценции использовались лазеры, работающие на длине волны 405 нм и 532 нм с мощностью до

200 мВт. Измерение спектров ФЛ проводилось на дифракционном монохроматоре МДР-23У, обеспечивающим обратную линейную дисперсию 26 Å/мм. Оптические сигналы детектировались фотоприемником на основе InGaAs *p-i-n* фотодиода типа G8370-03 (фирма «Hamamatsu», Япония), работающим при комнатной температуре в спектральной области 0,5–1,7 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, *a* и рис. 1, *б* представлены спектры ФЛ наноструктур Ge/Si с КТ Ge, созданных без облучения (образец 1) и с применением частичной ионизации пучков ионов Ge^+ при эпитаксиальном росте КТ Ge (образец 2), соответственно. Как видно на рис. 1, в области энергий $>1,02$ эВ в спектрах ФЛ присутствуют узкие линии $BE_{NP} \sim 1,150$ эВ и $BE_{TA} \sim 1,132$ эВ, $BE_{TO} \sim 1,192$ эВ, обусловленные бесфононной излучательной аннигиляцией связанных экситонов на атомах легирующей примеси (бор) в подложке Si, а также линии BE_{TA} и BE_{TO} , обусловленные аннигиляцией связанных экситонов с одновременным участием поперечных акустических фононов с энергией $TA \sim 18$ мэВ, и поперечных оптических фононов с энергией $TO \sim 58$ мэВ, соответственно. Широкие полосы с максимумами $QD \sim 0,90$ эВ и $QD1 \sim 0,81$ эВ в области энергий $<1,0$ эВ обусловлены излучательной рекомбинацией на КТ Ge с различными размерами в наноструктурах Ge/Si. Полоса QD может быть отнесена к непрямой излучательной рекомбинации электронов, локализованных в наноразмерных слоях Si, с дырками, локализованными в КТ Ge. Широкая полоса $QD1 \sim 0,81$ эВ с большей интенсивностью может быть отнесена к излучательной рекомбинации электронов с дырками в КТ Ge в условиях наличия дефектов структуры и упругих напряжений в области границы интерфейса Ge/Si [1, 5, 6]. Как видно на рис. 1*б*, облучение ионами Ge^+ при эпитаксиальном росте КТ Ge приводит к увеличению интенсивности полосы $QD1 \sim 0,81$ эВ в 4 раза. Эксперименты по облучению ионами Ge^+ с энергией ~ 2 кэВ при эпитаксиальном росте КТ Ge показали, что из-за образования дефектов структуры полупрозрачность полосы $QD1$ увеличивается и ее максимум на 7 мэВ смещается в высокоэнергетическую область, а полоса $QD \sim 0,90$ эВ не наблюдается в спектрах ФЛ, рис. 1, *б*.

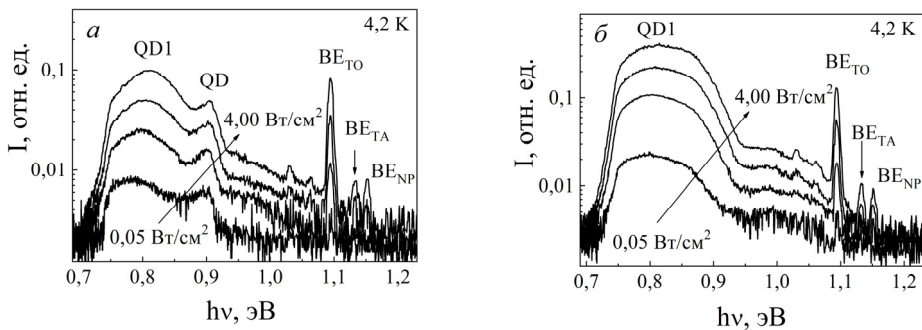


Рисунок 1. Зависимость спектров фотолуминесценции наноструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge от плотности мощности лазерного излучения на длине волны $\lambda = 405$ нм (*a* – без облучения, образец 1; *б* – с облучением, образец 2)

На рис. 2, *a* (образец 1) и рис. 2б (образец 2) представлены спектры ФЛ наноструктур Ge/Si с КТ Ge, зарегистрированные при температуре жидкого гелия и возбуждении неравновесных носителей заряда лазерным излучением на длине волны 532 нм.

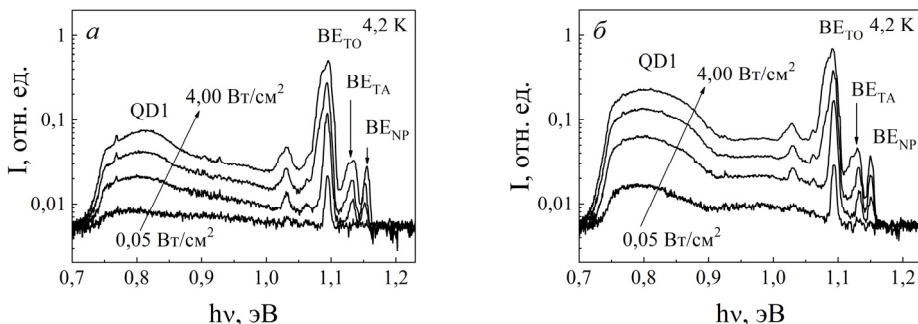


Рисунок 2. Зависимость спектров фотолюминесценции наноструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge от плотности мощности лазерного излучения на длине волны $\lambda = 532$ нм (*a* – без облучения, образец 1; *б* – с облучением, образец 2)

Как видно из сравнительного анализа рис. 2 и рис. 1, из-за большей глубины проникновения лазерного излучения при длине волны 532 нм в наноструктурах Ge/Si с КТ Ge по сравнению с длиной волны 405 нм в спектрах ФЛ доминирующим по интенсивности становится излучение в области энергий $> 1,0$ эВ от подложки и разделяющих слоев Si. Это указывает на перераспределение каналов излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда. При этом полоса QD1 $\sim 0,81$ эВ не изменяет своего спектрального положения, а полоса с максимумом QD $\sim 0,90$ эВ не проявляется в спектрах ФЛ наноструктур Ge/Si с КТ Ge.

Отметим, что в наноструктурах Ge/Si, облученных ионами Ge^+ при эпитаксиальном росте КТ Ge, при возбуждении неравновесных носителей заряда лазерным излучением на длине волны 532 нм интенсивность полосы фотолюминесценции QD1 $\sim 0,81$ эВ в 3 раза больше по сравнению с образцами без ионного облучения, рис. 2.

На рис. 3а и рис. 3б представлены сравнительные зависимости интегральной интенсивности полосы фотолюминесценции QD1 от плотности мощности в диапазоне от $0,05 \text{ Вт/см}^2$ до $4,00 \text{ Вт/см}^2$ для лазеров с различной длиной волны 405 нм и 532 нм, соответственно.

Эксперименты показали, что зависимость интенсивности полосы QD1 от плотности мощности возбуждения P описывается выражением $I \sim P^k$, где коэффициент $k = 0,50\text{--}0,56$ (образец 1) и $k = 0,61\text{--}0,65$ (образец 2) составили для лазеров с длиной волны 405 нм и 532 нм, соответственно. Эти данные демонстрируют увеличение коэффициента k для полосы QD1 $\sim 0,81$ эВ для наноструктур Ge/Si, облученных ионами Ge^+ при эпитаксиальном росте КТ Ge, образец 2, рис. 3. В дополнение к этому установлено, что для образца 1 не облученного ионами Ge^+ при увеличении плотности мощности лазерного излучения в диапазоне от $0,05 \text{ Вт/см}^2$ до $4,00 \text{ Вт/см}^2$ максимум полосы QD1 смещается в высокоэнергетическую область на $\sim 12\text{--}15$ мэВ, рис. 1, *a* и рис. 2, *a*. Это указывает на значительный разброс энергетических уровней, участ-

вующих в процессах излучательной рекомбинации в наноструктурах Ge/Si с КТ Ge, т.е. наличие флуктуаций электростатического потенциала на границе интерфейса КТ Ge – разделительные слои Si. Эксперименты показали, что в наноструктурах Ge/Si, облученных ионами Ge⁺ при эпитаксиальном росте КТ Ge, смещения максимума полосы QD1 ~ 0,81 эВ в диапазоне плотности мощности лазерного излучения 0,05 Вт/см² – 4,00 Вт/см² не происходит. Это указывает на то, что дефекты структуры, создаваемые при облучении ионами Ge⁺ во время эпитаксиального роста КТ Ge при температуре $T \sim 500^\circ\text{C}$ и последующей их кристаллизации в процессе формирования разделительных слоев Si с толщиной 15 нм при более высокой температуре $T \sim 600^\circ\text{C}$, значительно снижают величину флуктуаций электростатического потенциала на границе КТ Ge с разделительными слоями Si. При этом можно также предположить, что облучение ионами Ge⁺ во время эпитаксиального роста КТ Ge приводит к снижению концентрации дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации.

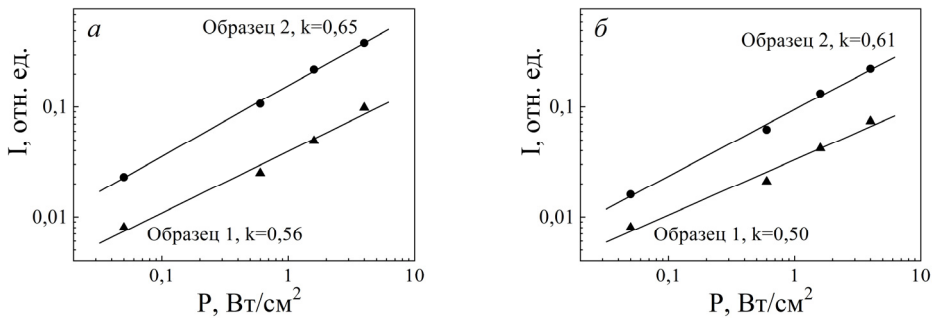


Рисунок 3. Зависимость интегральной интенсивности полосы QD1 от плотности мощности лазерного излучения 405 нм (а) и 532 нм (б) двух образцов наноструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge

Как известно, полоса фотолюминесценции QD1 ~ 0,81 эВ приписывается непрямой рекомбинации с участием двух типов носителей – электрона, локализованного в слое Si, и дырки, локализованной в квантовых точках Ge [6, 7]. Физически это означает, что из-за расщепления зоны проводимости электроны в слоях Si локализуются в минимумах долины Δ_2 , образованной за счет деформаций растяжения вблизи границы интерфейса КТ Ge/разделительные слои Si. Силами кулоновского взаимодействия электроны связываются с дырками, локализованными в КТ Ge, образуя экситоны. Оптические переходы $\Delta_2 - \text{hh}$ (подзона тяжелых дырок) происходят с участием фононов и поэтому являются непрямыми. Недавно было показано, что полоса в области энергий ~ 0.8 эВ обусловлена прямой излучательной рекомбинацией дырок в КТ Ge с электронами на энергетических уровнях дефектов структуры точечного типа (расщепленные – [110] междоузельные атомы Ge), образуемых в КТ Ge при низкоэнергетическом облучении ионами Ge⁺ [1, 4]. На основании исследований, проведенных в настоящей работе, предполагается, что полоса фотолюминесценции QD1 появляется за счет излучательной рекомбинации носителей заряда на интерфейсе 2-го типа: КТ Ge / разделительные слои Si с участием дефектов структуры в Si.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наноструктуры Ge/Si, содержащие до 10 чередующихся наноразмерных слоев Si и Ge, созданные методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием частичной ионизации молекулярных пучков (облучение ионами Ge^+ при эпитаксии квантовых точек Ge), обладают интенсивной фотолюминесценцией в ближней инфракрасной области спектра $\sim 1,4\text{--}1,7$ мкм. Установлено, что интенсивность полосы фотолюминесценции в области энергии $\sim 0,8$ эВ в наноструктурах Ge/Si с квантовыми точками Ge, сформированными с использованием ионизации пучков ионов Ge^+ при эпитаксиальном росте КТ Ge, в 3–4 раза превышает интенсивность аналогичных наноструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge, созданными без облучения. Преимущество использования ионно-молекулярных пучков при эпитаксии состоит также в стабилизации спектрального положения излучения в инфракрасной области спектра $\sim 0,8$ эВ.

Работа выполнена по программе ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма 8.2 (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. – V. 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. – V. 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. – V. 128, № 14. – P. 143101-1–143101-9.
4. Lasing from glassy quantum dots in crystalline Si / M. Grydlik [et. al.] // *ACS Photonics*. – 2016. – V. 3. – P. 298–303.
5. 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.
6. [6] 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.
7. Self-assembling SiGe and SiGeC nanostructures for light emitters and tunneling diodes / K. Eberl [et. al.] // *Thin Solid Films*. – 2000. – V. 369. – P. 33–38.

ЗАВИСИМОСТЬ ИК-ПОГЛОЩЕНИЯ СТРУКТУРЫ Si/SiO₂/Si ОТ УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ Si -СЛОЕВ

А. И. Мухаммад, П. И. Гайдук

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: rct.muhammadAI@bsu.by

Методом конечных разностей во временной области получены спектры поглощения инфракрасного излучения для структур Si/SiO₂/Si с поверхностным островковым Si-слоем различного типа и уровня легирования. Обнаружено, что при легировании островкового слоя от $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ширина полосы с интенсивностью поглощения выше 70% в спектре поглощения структуры Si/SiO₂/ n^+ -Si составила более 16 мкм. Показано, что структура с подложкой p -типа, легированной до $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и островковым Si-слоем n -типа, легированным до $7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ поглощает более 75% падающего на него излучения в диапазоне 4–20 мкм. Установлено, что использование в качестве островкового слоя как нелегированного кремния, так и ма-