

УДК 539.293+539.55

Д.С. Козырев, Т.М. Бурбаев

ЖЕЛТО-ЗЕЛЕНАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ЖИДКОСТИ В ТУННЕЛЬНО-ПРОЗРАЧНЫХ КРЕМНИЕВО-ГЕРМАНИЕВЫХ СЛОЯХ КРЕМНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

D.S. Kozyrev^{1,2}, T.M. Burbaev²

¹ Moscow State University,
1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia.

² P.N. Lebedev Physical Institute,
53 Leninskiy Ave., Moscow, 119991, Russia.

ELECTRON-HOLE LIQUID YELLOW-GREEN PHOTOLUMINESCENCE IN SiGe TUNNEL-TRANSPARENT LAYERS OF SILICON HETEROSTRUCTURES

В туннельно-прозрачных для электронов слоях SiGe гетероструктуры Si/Si_{0,91}Ge_{0,09}/Si методом фотолюминесценция (ФЛ) в ближней инфракрасной (БИК) и видимой областях спектра исследовано образование квазидвумерных многочастичных возбужденных состояний – биэкситонов, электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) и плазмы. Сравнение формы линии ФЛ в видимой области и численной свертки спектра в БИК области, отвечающего одноэлектронным переходам в ЭДЖ, показало, что излучение в видимой области при низких температурах и высоких уровнях возбуждения вызвано двухэлектронными переходами в квазидвумерной ЭДЖ.

КРЕМНИЕВО-ГЕРМАНИЕВАЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРА, ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ, ДВУХЭЛЕКТРОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ.

The formation of quasi-two-dimensional multiparticle excitations – biexcitons, electron-hole liquid (EHL) and plasma in tunnel-transparent for electrons SiGe layers of Si/Si_{0,91}Ge_{0,09}/Si heterostructures has been investigated by methods of photoluminescence (PL) in the near-infrared (NIR) and visible spectral ranges. When the PL line form in the visible region was compared with the numerical convolution of the spectrum in the NIR region, corresponding to one-electron transitions in EHL, it was apparent that the radiation in the visible region at low temperatures and high levels of excitation were caused by the two-electron transitions in quasi-two-dimensional EHL.

SiGe HETEROSTRUCTURES, ELECTRON-HOLE LIQUID, TWO-ELECTRON TRANSITIONS.

Данная статья посвящена исследованию многочастичных неравновесных состояний – биэкситонов, электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) и плазмы, возникающих при низких температурах с повышением уровня возбуждения, в напряженных квазидвумерных кремниево-германиевых (SiGe)-слоях гетероструктур Si/Si_{1-x}Ge_x/Si, методом спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ).

В объемных образцах кремния и германия электронно-дырочная жидкость обладает высокой стабильностью благодаря

многодолжности электронного спектра. Большие времена жизни экситонов в этих непрямозонных полупроводниках, позволяющие достаточно просто получать их высокую плотность, в сочетании с высокой стабильностью ЭДЖ (образуется при повышении плотности экситонов), позволили в разнообразных экспериментах, проведенных во второй половине прошлого века, хорошо изучить свойства фазового перехода «газ экситонов – ЭДЖ» [1–6]. В настоящей работе такой фазовый переход исследуется для квазидвумерного случая, в слое тол-

щиной 2 нм (боровский радиус экситона в объемном кремнии равен 5 нм).

Впервые свойства квазидвумерной ЭДЖ в кремниевых гетеросистемах были исследованы в гетероструктуре $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$ 1-го рода со слоем кремния, образующим квантовые ямы (КЯ) для электронов и дырок [7, 8]. Исследуемая в данной работе гетеросистема $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ предоставляет более широкие экспериментальные возможности. Для реализации размерного квантования в ней можно варьировать не только ширину КЯ (т. е. толщину слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$), но также и ее глубину путем изменения параметра x , т. е. состава, определяющего величины разрывов зон на гетерогранице $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Кроме того, структуры $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ относятся к гетероструктурам второго рода, что также может привести к большему разнообразию свойств неравновесной электронно-дырочной системы. Напряженный слой твердого раствора SiGe в гетероструктурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ образует потенциальную яму для дырок в валентной зоне. Глубина этой ямы ΔE_v превышает характерные тепловые энергии носителей заряда даже при небольшом содержании германия. В зоне проводимости слой SiGe образует барьер, разделяющий неравновесные электроны и дырки. Высота этого барьера ΔE_c уменьшается с уменьшением содержания германия и при $x \leq 0,1$ не превышает энергию связи экситонов в объемном кремнии [9, 10]. Ввиду наличия барьера, разделяющего носители, пространственно прямые экситоны и их конденсация в ЭДЖ наблюдались в таких гетероструктурах с достаточно широким барьером только в слоях с низким содержанием германия ($x \approx 0,05$ в работах [11, 12]). В таких структурах с увеличением уровня возбуждения искривление зон, вызванное кулоновским взаимодействием пространственно разделенных электронов и дырок, создает потенциальную яму для электронов в слое SiGe [13], сравнимую с высотой барьера, фактически превращая такие структуры в гетероструктуры первого рода.

ЭДЖ может наблюдаться и при большем содержании германия, если барьер в зоне проводимости – туннельно-прозрачный [14].

В этом случае неравновесные электроны, так же как и дырки, оказываются в SiGe -слое, образуя пространственно прямые экситоны, которые при увеличении плотности, при низких температурах, образуют пространственно прямую ЭДЖ.

В данной работе исследуется структура с туннельно-прозрачным барьером с содержанием германия в слое $x = 0,09$. В работе [15] в этой структуре при $T < 18$ К и высоких уровнях возбуждения была обнаружена и исследована квазидвумерная ЭДЖ в слое SiGe . При низком уровне накачки в температурном диапазоне $12 \text{ К} < T < 23 \text{ К}$ в этой структуре было обнаружено также излучение свободных биэкситонов. Эти результаты были получены методом спектроскопии ФЛ в ближней инфракрасной (БИК) области, возникающей при одноэлектронных переходах.

Известно, что в объемном кремнии ФЛ наблюдалась не только при одноэлектронных переходах в БИК области спектра, но также при двухэлектронных переходах в видимой области. Энергия квантов такой ФЛ близка к удвоенной ширине запрещенной зоны. При комнатной и азотной температурах наблюдалось излучение, обусловленное двухэлектронными переходами при межзонной рекомбинации [16], при гелиевой температуре – двухэлектронными переходами в ЭДЖ [17] и биэкситонах [18, 19]. В слое SiGe исследуемой гетероструктуры при $T = 15$ К в видимой области наблюдалось две линии ФЛ: широкая при большом уровне накачки и узкая при низком уровне [15]. Авторы статьи [15], по аналогии с работами [17, 19], предположили, что эти линии обусловлены двухэлектронными переходами, происходящими в квазидвумерной ЭДЖ и биэкситонах соответственно. В настоящей работе это предположение обосновывается достаточно строго путем численного сравнения форм линий ФЛ в БИК и видимой областях. Для точного описания формы линий излучения были проведены измерения спектров ФЛ таких структур в широком интервале уровней возбуждения и при понижении температуры до 1,8 К. В результате было показано, что в видимой области действительно наблюдается ФЛ

ЭДЖ, обусловленная двухэлектронными переходами.

Методика эксперимента

Исследуемая структура с напряженными слоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ была выращена на кремниевой подложке $\text{Si}(001)$ методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Толщина слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ составляла 2 нм, а значения толщины буферного и защитного слоев были равны 100 нм. Содержание германия в слое твердого раствора $x = 9\%$. При малых значениях x зонная структура ненапряженного твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ такая же, как у кремния. В объемном кремнии дно зоны проводимости шестикратно вырождено по энергии; зона проводимости имеет шесть эквивалентных минимумов энергии, а максимум валентной зоны (образованный зонами тяжелых и легких дырок) двукратно вырожден (конфигурация зон $\text{Si}(6,2)$ [3]). Из-за различия в параметрах кристаллических решеток кремния и SiGe псевдоморфный слой твердого раствора в структуре $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ испытывает радиальное сжатие в плоскости роста и одноосное растяжение вдоль направления роста. Внутренние напряжения в слое приводят к снятию вырождения.

На рис. 1, а представлена схема изоэнергетических поверхностей в зоне проводимости слоя SiGe гетероструктуры $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$. Шестикратное (без учета спина) вырождение дна зоны проводимо-

сти снято вследствие напряжений в слое: два минимума Δ_2 расположены выше, а четыре минимума Δ_4 , которые являются дном зоны в напряженном SiGe -слое, — ниже по энергии [10, 20]. По этой же причине, а также вследствие размерного квантования вырождение валентной зоны также снято; при этом потолком валентной зоны является зона тяжелых дырок (конфигурация зон — $\text{Si}(4,1)$).

На рис. 1, б представлена зонная диаграмма гетероструктуры $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$. Слой твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ образует потенциальный барьер для электронов в зоне проводимости величиной $\Delta E_c(\Delta_4) \approx 10$ мэВ [9, 21] и квантовую яму для дырок в валентной зоне, глубина которой составляет $\Delta E_v \approx 66$ мэВ [20]. Потолком валентной зоны в слое является зона тяжелых дырок с энергией размерного квантования $E_{hh} \approx 45$ мэВ. При таких параметрах потенциального барьера он является туннельно-прозрачным для электронов и максимум электронной плотности находится в центре барьера [14].

Исследования спектров ФЛ в ближней инфракрасной (БИК) области спектра проводились при температурах 1,8–60 К и уровнях возбуждения до 150 Вт/см². Для квазистационарного фотовозбуждения структуры использовался гелий-кадмиевый лазер с длиной волны $\lambda = 0,44$ мкм. Рекомбинационное излучение регистрировалось с помощью германиевого *pin*-фотодиода,

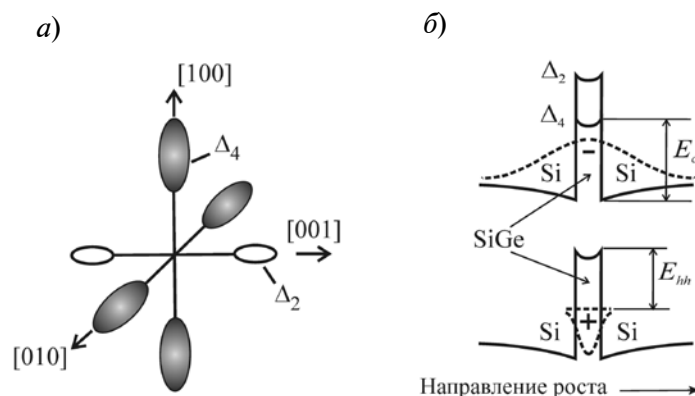


Рис. 1. Схема изоэнергетических поверхностей в зоне проводимости слоя твердого раствора (а) и зонная диаграмма (б) гетероструктуры $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$. Штриховыми линиями показаны распределения электронной и дырочной плотностей поперек слоя и уровень размерного квантования тяжелых дырок в КЯ

охлаждаемого жидким азотом, с использованием синхронного детектирования.

Исследовалась также ФЛ в видимой области спектра. Ширина запрещенной зоны кремния E_g при гелиевых температурах равна $\approx 1,17$ эВ. Эта энергия соответствует БИК области в спектрах ФЛ. Люминесценция в видимой области спектра возникает при совместной рекомбинации четырех частиц: двух электронов и двух дырок (так называемые двухэлектронные переходы). В объемном кремнии такая рекомбинация наблюдалась в работе [17]. Энергия испускаемых фотонов при такой рекомбинации равна суммарной энергии всех рекомбинирующих частиц. Закон сохранения импульса при таких переходах выполняется автоматически, поскольку в рекомбинации участвуют электроны из противоположных долин зоны проводимости (рис. 1, а). Совместная рекомбинация четырех частиц сопряжена с уменьшением вероятности рекомбинационных переходов и, следовательно, с величиной исследуемых сигналов ФЛ. Измерения в желто-зеленой области спектра проводились нами в широком интервале температур ($T = 1,8 - 15$ К) и уровнях возбуждения до 150 Вт/см². Для фотовозбуждения использовалось излучение титан-сапфирового лазера ($\lambda \approx 0,75$ мкм). Излучение ФЛ в видимой области спектра регистрировалось с помощью ПЗС-матрицы, охлаждаемой жидким азотом.

Результаты и их обсуждение

На рис 2, а представлен обзорный спектр ФЛ в БИК области исследуемой гетероструктуры Si/Si_{0,91}Ge_{0,09}/Si, измеренный при $T = 15$ К.

Наиболее интенсивными линиями являются ТО-фононные компоненты спектра от слоя SiGe (SiGe:ТО) и кремниевой подложки Si:ТО (в рекомбинации принимает участие поперечный оптический ТО-фонон). Фононная компонента от слоя представлена линиями 1 свободного пространственно прямого экситона, свободного биэкситона (2) и линией 3 ЭДЖ. В излучении кремниевой подложки доминирует линия 5 свободного экситона, а также линия 4 связан-

ного экситона. Бесфононные компоненты спектра SiGe : NP (правая часть рисунка) и Si:NP (не показаны) выражены значительно слабее фононных.

На рис. 2, б показана трансформация наиболее интенсивной ТО-компоненты спектра ФЛ гетероструктуры в БИК области при понижении температуры. Барьер в зоне проводимости туннельно прозрачен для электронов, поэтому волновая функция Δ_4 -электронов проникает в слой SiGe (см. рис. 1, б). В силу этого экситоны, образующиеся в слое, являются пространственно прямыми. При относительно высокой температуре $T = 21$ К (спектр V, линия 1 на рис. 2, б) в спектре ФЛ наблюдается только линия свободного экситона. С понижением

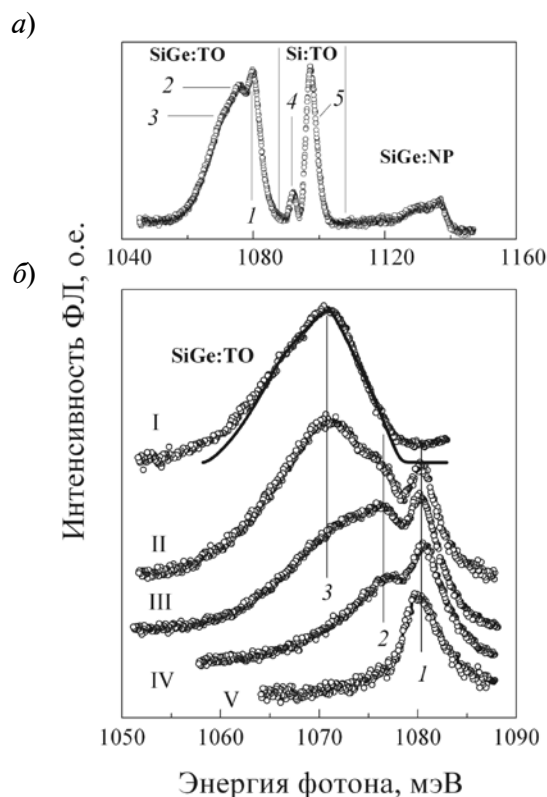


Рис. 2. Спектры ФЛ гетероструктуры Si/Si_{0,91}Ge_{0,09}/Si в БИК области шкалы электромагнитных волн; а – обзорный спектр, $T = 15$ К; б – изменение ТО-компоненты спектра при понижении температуры: $T = 21$ К (для спектра V), 18 К (IV), 15 К (III), 12 К (II), 1,8 К (I). Спектры II – V измерены при интенсивности $P = 3,8$ Вт·см⁻², спектр I – при $P = 8,5$ Вт·см⁻² Обозначения линий указаны в тексте. На спектре I сплошная линия – результат расчета

температуры, при $T = 18$ К (спектр IV, линия 2), в спектре возникает линия свободных биэкситонов. При дальнейшем понижении температуры, при $T = 15$ К (спектр III, линия 3), образуется пространственно прямая, электронно-дырочная жидкость. Затем линия ЭДЖ становится доминирующей в спектре (спектр I), при этом ее нормированная форма и положение в спектре перестают зависеть от уровня возбуждения и практически не зависят от температуры.

Анализ формы линии ФЛ пространственно прямой ЭДЖ в квазидвумерных слоях гетероструктуры $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ проведен нами по аналогии с анализом, проведенным в работе [22] для объемных полупроводников. Для трехмерного случая спектральная плотность излучения ФЛ ЭДЖ при одноэлектронных переходах – $J(h\nu_1)$ описывается следующим выражением:

$$J(h\nu_1) = J_0 \int_0^{h\nu_1} D_e(E) D_h(h\nu_1 - E) \times \quad (1)$$

$$\times f(E, E_{Fe}) f(h\nu_1 - E, E_{Fh}) dE,$$

где $D_{e,h}(E)$ – плотности состояний, и

$$f(E, E_{Fe,h}) = (1 + \exp((E - E_{Fe,h}) / kT))^{-1}$$

– функции Ферми для электронов и дырок.

Энергия фотона $h\tilde{\nu}$ излучения ТО-компоненты ЭДЖ равна

$$h\tilde{\nu} = h\nu_1 + E'_g - \hbar\omega,$$

где E'_g – перенормированная ширина запрещенной зоны в ЭДЖ; $\hbar\omega$ – энергия поперечного оптического (ТО) фона в слое SiGe (равна 59 мэВ).

Матричный элемент вероятности перехода J_0 не зависит от энергии и вынесен за знак интеграла. Для трехмерного случая зависимость плотности состояний от энергии корневая:

$$D_{e,h}(E) \sim E^{1/2},$$

а в двумерном случае плотность состояний не зависит от энергии. В работе [14] показано, что в гетероструктурах с туннельно-прозрачным барьером для электронов и КЯ для дырок электроны проявляют квазитрехмерные свойства ($D_e \sim E^{1/2}$), а дырки –

квазидвумерные ($D_h = \text{const}$).

На рис. 2, б на верхнем спектре сплошной линией показана форма линии ФЛ для $T = 1,8$ К, рассчитанная по формуле (1). Сравнение экспериментальных спектров с выражением (1) показало, что температура неравновесных носителей заряда близка к температуре в рабочей камере криостата. При обработке формы линии использовались два подгоночных параметра:

$$E_F = E_{Fe} + E_{Fh}, \quad \beta = E_{Fe} / E_F.$$

Параметр β зависит от числа долин ν_e , в которых находятся электроны в слое, эффективных масс плотностей состояний для электронов (m_{de}) и дырок (m_{dhh}), а также от толщины слоя d . Выбор β в качестве подгоночного параметра связан с тем, что эффективная масса плотности состояний тяжелых дырок m_{dhh} в напряженном слое SiGe зависит от их энергии [23] и определяется величиной E_{Fh} .

Нормированные спектры ФЛ в видимой (желто-зеленой) области спектра представлены на рис. 3. При достаточно высоком уровне накачки, при энергии, приблизительно равной удвоенной энергии НР-компонент ФЛ в БИК области (2255 мэВ), в спектрах доминирует широкая линия ФЛ с полушириной FWHM ≈ 24 мэВ. Так же как в БИК области, при используемых уровнях накачки линия люминесценции ЭДЖ обнаруживается при $T \leq 15$ К. Спектры a – $в$ (см. рис. 3) измерены при 15 К, но при различных уровнях накачки P . При $P > 20$ Вт·см $^{-2}$ форма линии ФЛ и ее положение в спектре перестают изменяться. Это свойство характерно для ЭДЖ. Сравнение форм линий ЭДЖ в БИК и видимой областях необходимо проводить при наиболее низких температурах, так как в этом случае указанные формы почти не зависят от температуры, а определяются только внутренними характеристиками системы: зависимостью плотности состояний для электронов и дырок от энергии E , а также величинами энергии Ферми электронов и дырок в ЭДЖ (см. формулу (1)). Спектр $г$ на рис. 3 (так же как и спектр I на рис. 2) измерен при температуре 1,8 К.

Спектральная плотность излучения,

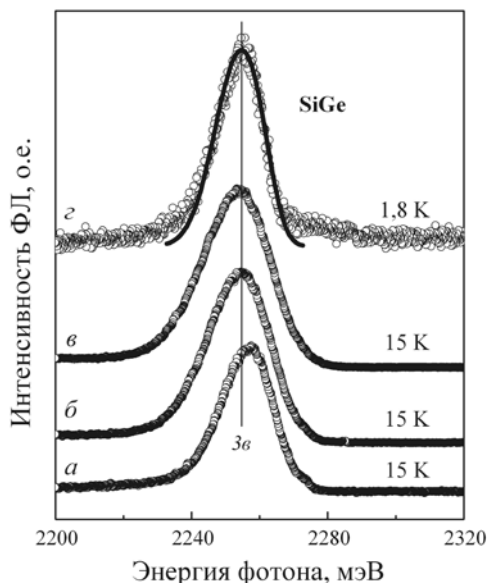


Рис. 3. Спектры ФЛ гетероструктуры Si/Si_{0,91}Ge_{0,09}/Si в видимой области шкалы электромагнитных волн при различных температурах T и уровнях интенсивности накачки P , Вт·см⁻²: 20 (а), 85 (б), 150 (в), 260 (г); T , К: 15 (а – г), 1,8 (з). Представлена численная свертка экспериментального спектра 1 (см. рис.2, б) (сплошная линия). Спектральная линия 3e – ФЛ ЭДЖ в видимой области

определяющая форму линии двухэлектронной рекомбинации в ЭДЖ, связана со спектральной формой линии ТО-фононной компоненты ФЛ ЭДЖ при одноэлектронных переходах следующим соотношением [17]:

$$J(h\nu_2) = \iint J(h\nu_1)J(h\nu'_1) \times \delta(h\nu_2 - h\nu_1 - h\nu'_1 - 2\hbar\omega) d\nu_1 d\nu'_1, \quad (2)$$

где $\hbar\omega$ – энергия ТО-(поперечного оптического) фонона.

Выражение (2) предполагает выполнение закона сохранения импульса между противоположными долинами, но не в пределах одной долины [17]. Интегрируя выражение (2) по $d\nu'_1$ с δ -функцией, получаем:

$$J(h\nu_2) = \int J(h\nu_1) \times \times J[(h\nu_2 - 2\hbar\omega) - h\nu_1] d\nu_1. \quad (3)$$

Таким образом, форма линии двухэлектронных переходов представляет собой свертку форм линий одноэлектронных пе-

реходов. Хорошее отношение сигнал/шум экспериментальной установки позволили нам для расчета $J(h\nu_2)$ использовать, в отличие от работы [17], экспериментальную, а не теоретическую зависимость $J(h\nu_2)$. Преимущество при таком подходе заключается не только в исключении подгоночных параметров (энергий Ферми для носителей в ЭДЖ), но и в отказе от предположения о виде зависимости плотности состояний для электронов и дырок от энергии $D_{e,h}(E)$. Численные расчеты проводились с использованием языка программирования C#. Отметим, что согласно выражению (3) свертка формы линии в БИК области сводится к численному интегрированию, при этом экспериментальные шумовые выбросы сглаживаются. Результат интегрирования (сплошная линия на верхнем спектре рис. 3) совмещен со спектром з, измеренным при температуре 1,8 К в видимой области спектра. Хорошее совпадение формы линии ФЛ (экспериментально измеренной) в видимой области со сверткой формы линии ФЛ, измеренной в БИК области, доказывает, что природа линий ФЛ в этих двух случаях одинакова.

Таким образом, в работе измерены спектры ФЛ квазидвумерного слоя SiGe гетероструктуры Si/Si_{0,91}Ge_{0,09}/Si в видимой и БИК областях шкалы электромагнитных волн при низких (вплоть до 1,8 К) температурах. Проведено сравнение формы линии ФЛ, экспериментально измеренной в видимой области, со сверткой экспериментальной формы линии ФЛ, измеренной в БИК области. Показано, что природа линий ФЛ в этих двух случаях одинакова. В БИК области мы наблюдаем излучение при одноэлектронных рекомбинационных переходах, в квазидвумерной ЭДЖ, а в видимой – при двухэлектронных. Тем самым получено новое дополнительное доказательство существования квазидвумерной ЭДЖ по спектрам ФЛ в видимой области.

Авторы признательны доктору физико-математических наук, заведующему отделением физики твердого тела ФИАН Н.Н. Сибельдину и кандидату физико-

математических наук, старшему научному сотруднику теоретического отдела ФИАН А.П. Силину за обсуждение результатов; кандидату физико-математических наук, старшему научному сотруднику ИФМ РАН Д.Н. Лобанову и кандидату физико-математических наук, заведующему лабораторией ИФМ РАН А.В. Новикову за выращивание структур; научному сотруд-

нику ФИАН М.Л. Скорикову и кандидату физико-математических наук, младшему научному сотруднику ФИАН Д.В. Шепелю за помощь при измерениях ФЛ в видимой области.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 13-02-00853, 13-02-90467) и программами РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rice, T.M.** Electron-hole liquid in semiconductors: Theoretical aspects [Text] / T.M. Rice // *Solid State Physics*. – New York: Academic Press, 1977. – Vol. 32. – P. 1–86.
2. **Hensel, J.C.** Electron-hole liquid in semiconductors: Experimental aspects [Text] / J.C. Hensel, T.G. Phillips, G.A. Thomas // *Ibid.* – P. 87–314.
3. The electron-hole drops in semiconductors [Text] // *Modern Problems in Condensed Matter Sciences* / Eds. C.D. Jeffries and L.V. Keldysh. – Amsterdam: North-Holland, 1983. – Vol. 6. – P. 656 p.
4. **Keldysh, L.V.** Electron-hole liquid in semiconductors [Text] / L.V. Keldysh, N.N. Sibeldin // *Ibid.* Eds. W. Eisenmenger, A.A. Kaplyanskii. – Amsterdam: North-Holland, 1986. – Vol. 16. – P. 455–686.
5. **Тиходеев, С.Г.** Электронно-дырочная жидкость в полупроводниках [Текст] / С.Г. Тиходеев // *Успехи физических наук*. – 1985. – Т. 145. – С. 3–50.
6. **Sibeldin, N.N.** Electron-hole liquid in semiconductors [Text] / N.N. Sibeldin // *Problems of Condensed Matter Physics: Quantum coherence phenomena in electron-hole and coupled matter-light systems: International Series of Monographs on Physics* / Eds. A.L. Ivanov, S.G. Tikhodeev. – Oxford: Oxford University Press, 2008. – Vol. 139. – P. 227–257.
7. **Pauc, N.** Two-dimensional electron-hole liquid in single Si quantum wells with large electronic and dielectric confinement [Text] / N. Pauc, V. Calvo, J. Eymery [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 92. – P. 236802-1–236802-4.
8. **Pauc, N.** Electronic and optical properties of Si/SiO₂ nanostructures. II. Electron-hole recombination at the Si/SiO₂ quantum-well – quantum-dot transition [Text] / N. Pauc, V. Calvo, J. Eymery [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 2005. – Vol. 72. – P. 205325-1–205324-8.
9. **Penn, C.** Application of numerical exciton-wave-function calculations to the question of band alignment in Si/Si_{1-x}Ge_x quantum wells [Text] / C. Penn, F. Schdffler, G. Bauer [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 1999. – Vol. 59. – P. 13314–13321.
10. **Van de Walle, C.G.** Theoretical calculations of hetero-junction discontinuities in the Si/Ge system [Text] / C.G. Van de Walle, R.M. Martin // *Phys. Rev. B*. – 1986. – Vol. 34. – P. 5621–5634.
11. **Бурбаев, Т.М.** Электронно-дырочная жидкость в напряженных SiGe-слоях кремниевых гетероструктур [Текст] / Т.М. Бурбаев, Е.А. Бобрик, В.А. Курбатов [и др.] // *ЖЭТФ*. – 2007. – Т. 85 – Вып. 7. – С. 410–413.
12. **Багаев, В.С.** Каналы излучательной рекомбинации и фазовые переходы в системе неравновесных носителей в тонкой квантовой яме Si_{0.93}Ge_{0.07}/Si [Текст] / В.С. Багаев, В.В. Зайцев, В.С. Кривобок [и др.] // *ЖЭТФ*. – 2008. – Т. 134. – Вып. 5. – С. 988–995.
13. **Baier, T.** Type-II band alignment in Si/Si_{1-x}Ge_x quantum wells from photoluminescence line shifts due to optically induced band-bending effects: Experiment and theory [Text] / T. Baier, U. Mantz, K. Thonke [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 1994. – Vol. 50. – № 20. – P. 15191–15196.
14. **Бурбаев, Т.М.** Электронно-дырочная жидкость и экситонные молекулы в квазидвумерных SiGe-слоях гетероструктур Si/SiGe/Si [Текст] / Т.М. Бурбаев, М.Н. Гордеев, Д.Н. Лобанов [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. – 2010. – Т. 92. – Вып. 5. – С. 341–345.
15. **Shepel, D.** Quasi-two-dimensional electron-hole liquid and biexcitons in SiGe layers of Si/SiGe/Si heterostructures [Text] / D. Shepel, T. Burbaev, N. Sibeldin [et al.] // *Physica Status Solidi. C8*. – 2011. – № 4. – P. 1186–1189.
16. **Betzler, K.** Two-electron band-to-band transitions in solids [Text] / K. Betzler, T. Weller, R. Conradt // *Phys. Rev. B*. – 1972. – Vol. 6. – P. 1394–1399.
17. **Betzler, K.** Two-electron transitions in the condensed phase of nonequilibrium carriers in Si [Text] / K. Betzler, R. Conradt // *Phys. Rev. Lett.* – 1972. – Vol. 28. – № 21 – P. 1562–1563.
18. **Schmid, W.** Four-particle radiative transitions of biexcitons and multiple bound excitons in Si [Text] / W. Schmid // *Phys. Rev. Lett.* – 1980.



– Vol. 45. – P. 1726–1729.

19. **Thewalt, M.L.W.** Green and near-infrared luminescence due to the biexcitons in unperturbed silicon [Text] / M.L.W. Thewalt, W.G. McMullan // Phys. Rev. B. – 1984. – Vol. 30. – P. 6232–6234.

20. **Yang, L.** Si/SiGe heterostructure parameters for device simulations [Text] / L. Yang, J.R. Watling, R.C.W. Wilkins [et al.] // Semicond. Sci. Technol. – 2004. – Vol. 19. – P. 1174–1182.

21. **Rieger, M.M.** Electronic-band parameters in strained $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ alloys on $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ substrates [Text] / M.M. Rieger, P. Vogl // Phys. Rev. B. – 1993.

– Vol. 48. – № 19. – P. 14276–14286.

22. **Pokrovsky, Ya.E.** Experimental evidences of the existence of condensed phase of non-equilibrium charge carriers in Ge and Si [Text] / Ya.E. Pokrovsky, A.S. Kaminsky, K.I. Svistunova // Proc. of the Tenth International Conf. on the Physics of Semiconductors. – Cambridge, Mass., AEC Division of Technical Information, Springfield, Virginia, 1970. – 504 p.

23. **Manku, T.** Effective mass for strained p -type Si [Text] / T. Manku, A. Nathan // J. App. Phys. – 1991. – Vol. 69. – № 12. – P. 8414–8416.

REFERENCES

1. **Rice T.M.** Electron-hole liquid in semiconductors: Theoretical aspects. Solid State Physics. – New York: Academic Press, 1977. – Vol. 32. – P. 1–86.

2. **Hensel J.C., Phillips T.G., Thomas G.A.** Electron-hole liquid in semiconductors: Experimental aspects. Solid State Physics. – New York: Academic Press, 1977. – Vol. 32. – P. 87–314.

3. The electron-hole drops in semiconductors. Modern Problems in Condensed Matter Sciences. Eds. C.D. Jeffries and L.V. Keldysh, Amsterdam: North-Holland, 1983. – Vol. 6. – 656 p.

4. **Keldysh L.V., Sibeldin N.N.** Electron-hole liquid in semiconductors. Modern Problems in Condensed Matter Sciences. Eds. W. Eisenmenger, A.A. Kaplyanskiy. – Amsterdam: North-Holland. – 1986. – Vol. 16. – P. 455–686.

5. **Tikhodeev S.G.** Elektronno-dyrochnaia zhidkost' v poluprovodnikakh. *Physics-Uspekhi*, 1985. – T. 145. – S. 3–50. (rus)

6. **Sibeldin N.N.** Electron-hole liquid in semiconductors. Problems of Condensed Matter Physics: Quantum coherence phenomena in electron-hole and coupled matter-light systems: International Series of Monographs on Physics, Eds. A.L. Ivanov, S.G. Tikhodeev, Oxford, Oxford University Press. – 2008. – Vol. 139. – P. 227–257.

7. **Pauc N., Calvo V., Eymery J. et al.** Two-dimensional electron-hole liquid in single Si quantum wells with large electronic and dielectric confinement. Phys. Rev. Lett. – 2004. – Vol. 92. – P. 236802-1–236802-4.

8. **Pauc N., Calvo V., Eymery J. et al.** Electronic and optical properties of SiSiO_2 nanostructures. II. Electron-hole recombination at the SiSiO_2 quantum-well–quantum-dot transition. Phys. Rev. B. – 2005. – Vol. 72. – P. 205325-1–205324-8.

9. **Penn C., Schaffler F., Bauer G. et al.** Application of numerical exciton-wave-function calculations to the question of band alignment in $\text{SiSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ quantum wells. Phys. Rev. B. – 1999. – Vol. 59. – P. 13314–13321.

10. **Van de Walle C.G., Martin R.M.** Theoretical calculations of hetero-junction discontinuities in the SiGe system. Phys. Rev. B. – 1986. – Vol. 34. – P. 5621–5634.

11. **Burbaev T.M., Bobrik E.A., Kurbatov V.A. et al.** Elektronno-dyrochnaia zhidkost' v napriazhennykh SiGe-sloiakh kremnievykh geterostruktur. JETP. – 2007. – T. 85. – Vyp. 7. – S. 410–413. (rus)

12. **Bagaev V.S., Zaitsev V.V., Krivobok V.S. et al.** Kanaly izluchatel'noi rekombinatsii i fazovye perekhody v sisteme neravnovesnykh nositelei v tonkoi kvantovoi iame $\text{Si}_{0.93}\text{Ge}_{0.07}/\text{Si}$. JETP. – 2008. – T. 134. – Vyp. 5. – S. 988–995. (rus)

13. **Baier T., Mantz U., Thonke K. et al.** Type-II band alignment in $\text{SiSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ quantum wells from photoluminescence line shifts due to optically induced band-bending effects: Experiment and theory. Phys. Rev. B. – 1994. – Vol. 50. – № 20. – P. 15191–15196.

14. **Burbaev T.M., Gordeev M.N., Lobanov D.N. et al.** Elektronno-dyrochnaia zhidkost' i eksitonnye molekuly v kvazidvumernykh SiGe-sloiakh geterostruktur SiSiGeSi . JETP Letters. – 2010. – T. 92. – Vyp. 5. – S. 341–345. (rus)

15. **Shepel D., Burbaev T., Sibeldin N.** Quasi-two-dimensional electron-hole liquid and biexcitons in SiGe layers of SiSiGeSi heterostructures. et al. Physica Status Solidi. C8. – 2011. – № 4. – P. 1186–1189.

16. **Betzler K., Weller T., Conradt R.** Two-electron band-to-band transitions in solids. Phys. Rev. B. – 1972. – Vol. 6. – P. 1394–1399.

17. **Betzler K., Conradt R.** Two-electron transitions in the condensed phase of nonequilibrium carriers in Si. Phys. Rev. Lett. – 1972. – Vol. 28. – № 21. – P. 1562–1563.

18. **Schmid W.** Four-particle radiative transitions of biexcitons and multiple bound excitons in Si. Phys. Rev. Lett. – 1980. – Vol. 45. – P. 1726–1729.

19. **Thewalt M.L.W., McMullan W.G.** Green and near-infrared luminescence due to the biexci-

tons in unperturbed silicon. Phys. Rev. B. – 1984. – Vol. 30. – P. 6232–6234.

20. **Yang L., Watling J.R., Wilkins R.C.W. et al.** SiSiGe heterostructure parameters for device simulations. Semicond. Sci. Technol. – 2004. – Vol. 19. – P. 1174–1182.

21. **Rieger M.M., Vogl P.** Electronic-band parameters in strained $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ alloys on $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ substrates. Phys. Rev. B. – 1993. – Vol. 48. – № 19. – P. 14276–14286.

22. **Pokrovsky Ya.E., Kaminsky A.S., Svistunova K.I.** Experimental evidences of the existence of condensed phase of non-equilibrium charge carriers in Ge and Si. Proceedings of the Tenth International Conference on the Physics of Semiconductors. – Cambridge, Mass., AEC Division of Technical Information, Springfield, Virginia. – 1970. – 504 p.

23. **Manku T., Nathan A.** Effective mass for strained p -type Si. J. App. Phys. – 1991. – Vol. 69. – № 12. – P. 8414–8416.

КОЗЫРЕВ Дмитрий Сергеевич – студент физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
diman-mich@yandex.ru

БУРБАЕВ Тимур Маруанович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отделения физики твердого тела Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53
burbaev@sci.lebedev.ru