

Спектры возбуждения и кинетика фотолюминесценции в структурах с самоформирующимися Ge(Si) наноструктурами

© А.Н. Яблонский^{*†}, Н.А. Байдакова^{*†}, А.В. Новиков^{*†}, Д.Н. Лобанов^{*†}, М.В. Шалеев^{*}

^{*} Институт физики микроструктур Российской академии наук,
607680 Нижний Новгород, Россия

[†] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Исследованы спектральные и временные характеристики фотолюминесценции, связанной с излучательной рекомбинацией носителей заряда в многослойных структурах SiGe/Si(001) с самоформирующимися Ge(Si) островками. Рассмотрены временные зависимости фотолюминесценции Ge(Si) островков в широком интервале времен задержки после импульса накачки при различных уровнях оптического возбуждения. Исследованы спектры возбуждения фотолюминесценции Ge(Si) островков в структурах SiGe/Si(001) в области межзонной и подзонной оптической накачки, соответствующие различным временным компонентам в кинетике релаксации фотолюминесценции. Обнаружено существенное различие вида спектров возбуждения для быстрой (0–100 мкс) и медленной (100 мкс–50 мс) компонент сигнала фотолюминесценции островков. Показано, что существенная зависимость вида спектров возбуждения фотолюминесценции Ge(Si)/Si(001) островков от мощности оптической накачки связана с продолжительной диффузией неравновесных носителей заряда из слоев объемного кремния в область Ge(Si)-островков при высоких уровнях возбуждения.

1. Введение

Структуры с самоформирующимися Ge(Si)-наноструктурами являются перспективным материалом для создания на кремнии источников света и фотоприемников, работающих в диапазоне 1300–1600 нм. Кроме того, одновременное наблюдение в структурах с Ge(Si)-островками сигналов электролюминесценции и фотопроводимости в указанном спектральном диапазоне при комнатной температуре [1,2] делает такие структуры перспективными для создания оптопары. Данная работа посвящена исследованию процессов поглощения света и излучательной рекомбинации носителей заряда в многослойных структурах с Ge(Si)-островками методами спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) с временным разрешением и спектроскопии возбуждения ФЛ. Ранее было обнаружено, что сигнал ФЛ Ge(Si)-островков наблюдается на временах вплоть до десятков миллисекунд [3], что значительно превышает характерное время спада межзонной ФЛ объемного кремния. Также было показано, что сигнал ФЛ островков наблюдается как при межзонной оптической накачке Si матрицы, так и при подзонной накачке [4,5]. В данной работе было проведено исследование временных зависимостей ФЛ структур с Ge(Si)-островками в широком интервале времен задержки после импульса накачки при различных уровнях оптического возбуждения. Также были исследованы спектры возбуждения ФЛ Ge(Si)-островков в области межзонной и подзонной оптической накачки, соответствующие различным временным компонентам в кинетике релаксации ФЛ.

2. Эксперимент

Многослойные SiGe/Si(001)-структуры с самоформирующимися наноструктурами были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии из твердых источников при температуре 650°C и содержали 20 слоев Ge(Si)-островков, разделенных слоями кремния толщиной 17–20 нм. Подробное описание условий роста структур с островками представлено в работе [6].

Для возбуждения сигнала ФЛ использовалось импульсное излучение параметрического генератора света MOPO-SL, перестраиваемого в широком спектральном диапазоне ($\lambda_{ex} = 400–1600$ нм). Длительность импульса накачки составляла ~ 5 нс. Сигнал ФЛ регистрировался с помощью решеточного монохроматора Acton 2300i, фотоэлектронного умножителя Hamamatsu на основе InP/InGaAs (спектральный диапазон 930–1700 нм, время отклика ~ 2 нс) и цифрового осциллографа LeCroy. Методика получения спектров возбуждения ФЛ подробно изложена в работе [5]. Измерения проводились при температуре 4.2 К с использованием заливного гелиевого криостата.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показан типичный спектр ФЛ с временным разрешением структуры с самоформирующимися Ge(Si)-островками, полученный при межзонном оптическом возбуждении ($\lambda_{ex} = 750$ нм). Наряду с сигналом ФЛ, связанным с межзонной излучательной рекомбинацией электронно-дырочных пар (экситонов) в Si-подложке и разделительных Si-слоях (пик с максимумом на длине волны 1130 нм), в спектрах исследованных структур наблюдаются линии ФЛ, соответ-

[†] E-mail: yablonsk@ipm.sci-nnov.ru,

^{††} E-mail: banatale@ipm.sci-nnov.ru

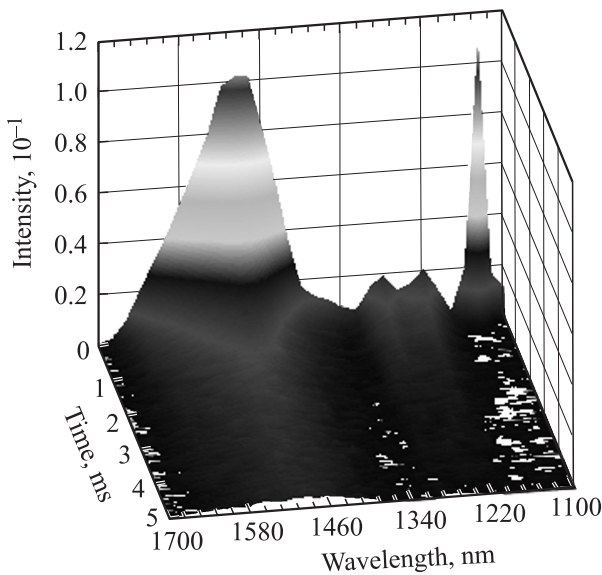


Рис. 1. Спектро-кинетическая зависимость ФЛ многослойной структуры с Ge(Si)-островками. $\lambda_{ex} = 750$ нм, $T = 4.2$ К.

ствующие излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда в Ge(Si)-островках (линия в области 1400–1700 нм) и в смачивающих SiGe-слоях (линия в области 1200–1300 нм). Сигнал ФЛ Ge(Si)-островков связывается с непрямой в пространстве рекомбинацией носителей заряда через гетерограницу островка (дырок, локализованных в островке, и электронов в слоях Si на границе с островком) [7,8]. При высоких уровнях оптической накачки временные зависимости ФЛ Ge(Si)-островков характеризуются наличием нескольких участков с различными временами спада ФЛ, как было ранее описано в литературе [9]. Начальный участок кинетики ФЛ с характерными временами спада 1–20 мкс соответствует быстрому каналу рекомбинации носителей заряда в островках, возникшему благодаря значительному перекрытию волновых функций электронов и дырок при высокой концентрации носителей заряда [9]. Сигнал ФЛ Ge(Si)-островков наблюдается на временах вплоть до десятков миллисекунд после импульса возбуждающего излучения [3], что значительно превышает характерное время спада межзонной ФЛ кремния в рассматриваемых структурах. Данный факт свидетельствует об эффективной локализации носителей заряда в островках и незначительном влиянии процессов безызлучательной рекомбинации носителей заряда в исследованных SiGe/Si-гетероструктурах.

С целью изучения процессов возбуждения ФЛ самоформирующихся Ge(Si)-островков в данной работе были исследованы спектры возбуждения ФЛ островков (зависимости интенсивности ФЛ островков от длины волны возбуждающего излучения) в области как межзонной ($h\nu_{ex} > E_g(\text{Si})$), так и подзонной ($h\nu_{ex} < E_g(\text{Si})$) оптической накачки. Спектры возбуждения ФЛ Ge(Si)-

островков были получены интегрированием кинетических зависимостей сигнала ФЛ островков по определенному временному интервалу после импульса возбуждающего излучения. Выбор временного интервала интегрирования позволяет исследовать процессы излучательной рекомбинации носителей заряда в рассматриваемых структурах, характеризующиеся различными временами затухания.

На рис. 2, *a* приведены спектры возбуждения Ge(Si)-островков, полученные интегрированием сигнала ФЛ островков по временному интервалу 0–100 мкс после импульса накачки. Как видно из рисунка, вид спектров возбуждения ФЛ островков существенно зависит от мощности возбуждающего излучения, что объясняется различной зависимостью интенсивности сигнала ФЛ островков от мощности накачки для подзонного ($\lambda_{ex} > 1060$ нм) и межзонного ($\lambda_{ex} \leq 1060$ нм) возбуждения (рис. 2, *b*). При подзонном возбуждении с уве-

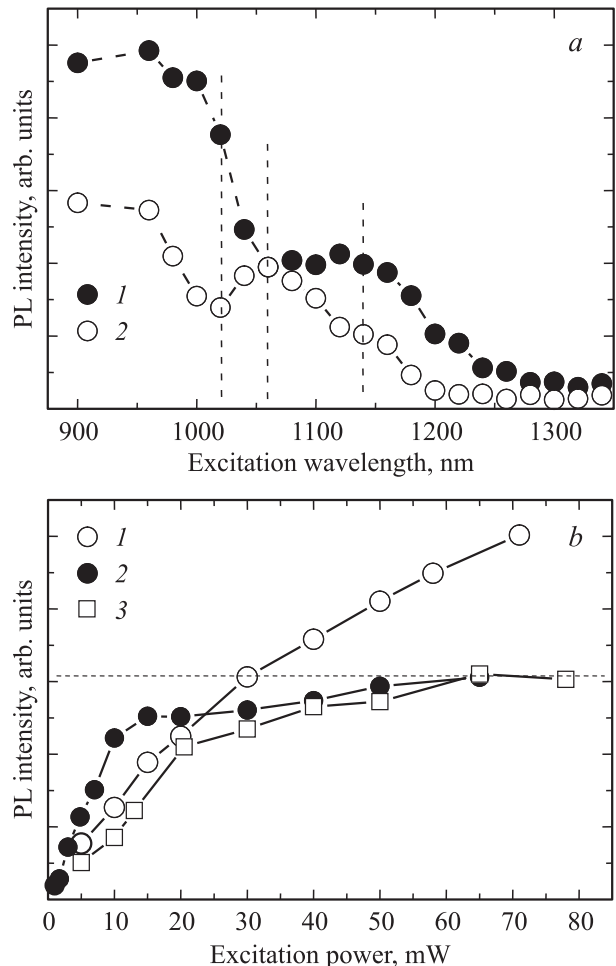


Рис. 2. *a* — спектры возбуждения ФЛ Ge(Si)-островков, полученные для интервала интегрирования $\tau = 0–100$ мкс при различных значениях мощности возбуждающего излучения, мВт: 1 — 60, 2 — 10. *b* — зависимости интегральной интенсивности ФЛ островков для временного интервала $\tau = 0–100$ мкс от мощности накачки при различных длинах волн возбуждения, нм: 1 — 1020, 2 — 1060, 3 — 1140. $T = 4.2$ К.

личением мощности накачки наблюдалось насыщение сигнала ФЛ островков, причем уровень насыщения совпадал в случаях возбуждения на длинах волн 1060 и 1140 нм. Различие значений мощности накачки, при которых наступало насыщение при возбуждении на разных длинах волн, связано с существенной зависимостью коэффициента поглощения излучения в исследуемых SiGe/Si-структурах (как в объемном кремнии, так и в SiGe-гетероструктурах) от длины волны в данной спектральной области [10] и, как следствие, с различным количеством электронно-дырочных пар, генерируемых вблизи активной области структуры, при разных длинах волн возбуждения. В то же время в области межзонной накачки в рассмотренном диапазоне значений мощности возбуждающего излучения (до 70 мВт) наблюдался монотонный рост интенсивности ФЛ островков, и насыщение отсутствовало (рис. 2, b).

На рис. 3 приведены спектры возбуждения ФЛ Ge(Si)-островков, полученные в результате интегрирования кинетических зависимостей ФЛ по временному интервалу 100 мкс–50 мс, соответствующему медленным процессам излучательной рекомбинации в островках. В данном случае при высоких уровнях накачки интенсивность ФЛ островков практически не зависела от длины волны возбуждения вплоть до значения $\lambda_{ex} \sim 1200$ нм, т.е. насыщение сигнала ФЛ островков при достаточно высокой мощности накачки наблюдалось как при подзонном, так и при межзонном возбуждении. Для $\lambda_{ex} > 1200$ нм в спектрах возбуждения ФЛ Ge(Si)-островков независимо от выбранного временного интервала интегрирования наблюдалось резкое падение

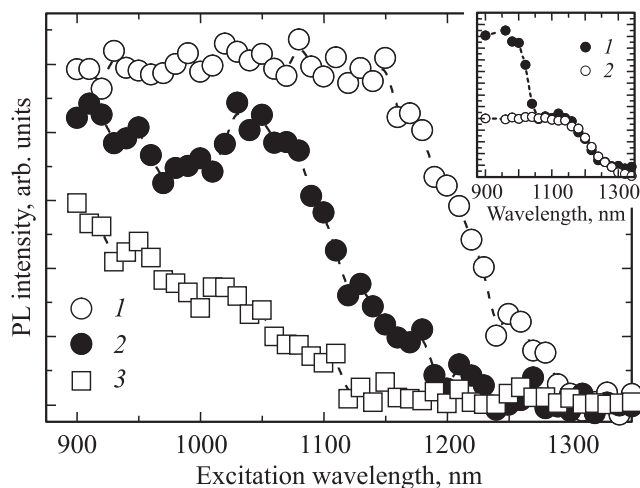


Рис. 3. Спектры возбуждения ФЛ Ge(Si)-островков, полученные для интервала интегрирования $\tau = 0.1$ –50 мс при различных значениях мощности возбуждающего излучения, мВт: 1 — 60, 2 — 10, 3 — 3. На вставке — спектры возбуждения ФЛ Ge(Si)-островков, полученные интегрированием по различным временным интервалам (1 — $\tau = 0$ –0.1 мс, 2 — $\tau = 0.1$ –50 мс) при мощности накачки 60 мВт, нормированные на интенсивность сигнала ФЛ островков в насыщении при подзонном возбуждении.

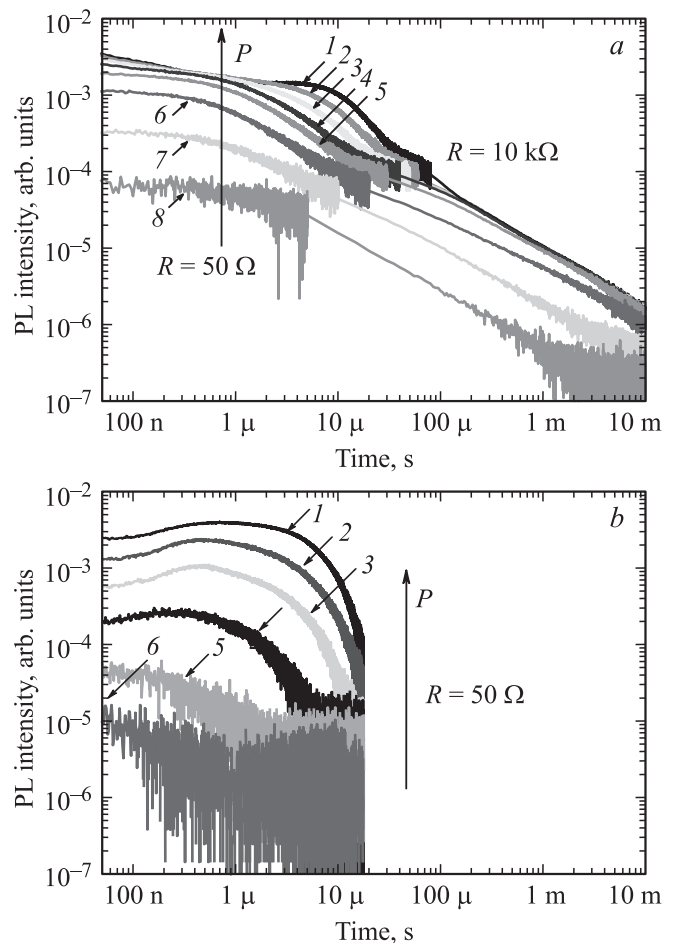


Рис. 4. Временные зависимости ФЛ Ge(Si)-островков (a) и межзонной ФЛ в кремнии (b) при различных значениях мощности накачки, мВт: 1 — 10, 2 — 4, 3 — 2, 4 — 1, 5 — 0.4, 6 — 0.1, 7 — 0.04, 8 — 0.01. $\lambda_{ex} = 750$ нм, $T = 4.2$ К.

интенсивности ФЛ (см. вставку на рис. 3), что, по-видимому, связано с достижением края поглощения излучения в Ge(Si)-островках.

Для установления причины существенного различия спектров возбуждения ФЛ островков, полученных для различных временных интервалов, были исследованы временные зависимости интенсивности ФЛ островков при различных уровнях межзонного ($\lambda_{ex} = 750$ нм) оптического возбуждения (рис. 4, a). Для повышения чувствительности системы регистрации измерение сигнала ФЛ на разных временных интервалах осуществлялось с использованием различных нагрузочных сопротивлений на выходе фотоприемника (50 Ом для интервала 0–50 мкс и 10 кОм для интервала 0.05–50 мс). Было обнаружено, что на временных интервалах 0–1 мкс и 0.1–10 мс насыщение ФЛ островков возникает при значении средней мощности накачки ~ 1 мВт. В то же время в интервале 1–100 мкс рост интенсивности ФЛ с увеличением мощности накачки наблюдался вплоть до максимальных значений мощности возбуждающего

излучения (~ 10 мВт). При этом начальный временной интервал, в котором наблюдалось насыщение сигнала ФЛ островков, удлинялся с увеличением уровня накачки от 1 мкс до 10–20 мкс (рис. 4, *a*).

На рис. 4, *b* приведены временные зависимости межзонной ФЛ (ФЛ, связанной с излучательной рекомбинацией неравновесных носителей заряда в Si-слоях) в исследованных структурах SiGe/Si, полученные при тех же значениях мощности возбуждающего излучения, что и кинетики ФЛ Ge(Si)-островков (рис. 4, *a*). Как видно из приведенных зависимостей, заметный сигнал межзонной ФЛ начинает регистрироваться при значениях мощности оптической накачки, соответствующих установлению неэкспоненциального характера кинетических кривых ФЛ Ge(Si)-островков (рис. 4, *a*). Более того, изменение характерного времени жизни неравновесных носителей заряда в матрице Si при увеличении мощности возбуждающего излучения совпадает с удлинением временного интервала, на котором наблюдается насыщение сигнала ФЛ островков (от 1 до 20 мкс) (рис. 4, *a* и *b*). Данный эффект связан, по-видимому, с тем, что пока в кремниевой матрице сохраняется высокая концентрация неравновесных электронно-дырочных пар (что подтверждается высокой интенсивностью межзонной ФЛ объемного Si) носители заряда могут диффундировать в область Ge(Si)-островков, поддерживая постоянный уровень интенсивности ФЛ островков. В то же время при возбуждении структур излучением с энергией фотона, меньшей ширины запрещенной зоны кремния, эффективность генерации электронно-дырочных пар в кремниевой матрице существенно снижается, и канал, связанный с возбуждением ФЛ островков через кремниевую матрицу перестает быть основным [4]. Таким образом, модификация вида спектров возбуждения ФЛ Ge(Si)-островков с увеличением мощности оптической накачки и дополнительное нарастание сигнала ФЛ островков в области межзонной накачки по сравнению с областью подзонной накачки, наблюдаемые при регистрации спектров возбуждения во временном интервале 0–100 мкс (см. рис. 2, а также вставку на рис. 3), по-видимому, связаны с диффузией неравновесных носителей заряда из Si-слоев, окружающих Ge(Si)-островки, и Si-подложки в активную область структуры при высоких уровнях возбуждения. В то же время, как было показано выше, диффузия носителей заряда из Si-слоев в активную область структуры при высоких уровнях возбуждения не оказывает влияния на интенсивность ФЛ Ge(Si)-островков на временах задержки после возбуждающего импульса, превышающих 100 мкс. В связи с этим в спектрах возбуждения ФЛ островков, полученных для интервала интегрирования от 100 мкс до 50 мс при достаточно высокой мощности накачки, интенсивность ФЛ практически постоянна при значениях длины волны возбуждения, превышающих 1200 нм (рис. 3), и насыщение сигнала ФЛ островков наблюдается как при подзонном, так и при межзонном возбуждении.

4. Заключение

В работе исследованы спектральные и временные характеристики ФЛ, связанной с излучательной рекомбинацией носителей заряда в многослойных структурах SiGe/Si(001) с самоформирующимися Ge(Si)-островками. Получены временные зависимости ФЛ Ge(Si)-островков в широком интервале времен задержки после импульса накачки при различных уровнях оптического возбуждения. Исследованы спектры возбуждения ФЛ Ge(Si)-островков в структурах SiGe/Si(001) в области межзонной и подзонной оптической накачки, соответствующие различным временным компонентам в кинетике релаксации ФЛ. Обнаружено существенное различие вида спектров возбуждения для быстрой (0–100 мкс) и медленной (100 мкс–50 мс) компонент сигнала ФЛ островков. Показано, что существенная зависимость вида спектров возбуждения ФЛ Ge(Si)-островков от мощности оптической накачки связана с особенностями процесса возбуждения ФЛ островков через электронную подсистему кремния, а именно с продолжительной диффузией неравновесных носителей заряда из слоев объемного Si в область Ge(Si)-островков при высоких уровнях возбуждения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 14-02-01157 и 15-02-05272) и Совета по грантам президента РФ (СП-6523.2013.5) с помощью оборудования ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“ при ИФМ РАН.

Список литературы

- [1] V.G. Talalaev, G.E. Cirilin, A.A. Tonkikh, N.D. Zakharov, P. Werber. *Phys. Stat. Solidi*, **198**, R4 (2003).
- [2] D.N. Lobanov, A.V. Novikov, K.E. Kudryavtsev, A.N. Yablonskiy, A.V. Antonov, Yu.N. Drozdov, D.V. Shengurov, V.B. Shmagin, Z.F. Krasilnik, N.D. Zakharov, P. Werner. *Physica E*, **41**, 935 (2009).
- [3] Н.А. Байдакова, А.Н. Яблонский, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков. *Тр. XVIII Международ. симп. „Нанопластика и нанопластика“*, 10–14 марта 2014 г., Нижний Новгород, с. 194.
- [4] А.Н. Яблонский, Н.А. Байдакова, А.В. Новиков, Д.Н. Лобанов. *ФТП*, **47** (11), 509 (2013).
- [5] Н.А. Байдакова, А.В. Новиков, Д.Н. Лобанов, А.Н. Яблонский. *Письма в ЖТФ*, **38** (18), (2012).
- [6] Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, К.Е. Кудрявцев, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, Д.В. Шенгуров, В.Б. Шмагин, А.Н. Яблонский. *ФТП*, **42** (3), 291 (2008).
- [7] В.Я. Алешкин, Н.А. Бекин, Н.Г. Калугин, З.Ф. Красильник, А.В. Новиков, В.В. Постников, Х. Сейрингер. *Письма ЖЭТФ*, **67** (1), 46 (1998).
- [8] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский. *Письма ЖЭТФ*, **76** (6), 425 (2002).
- [9] B.V. Kamenev, L. Tsybeskov, J.-M. Baribeau, D.J. Lockwood. *Phys. Rev. B*, **72**, 193 306 (2005).
- [10] R. Braunstein, A.R. Moore, F. Herman. *Phys. Rev.*, **109**, 695 (1958).

Редактор А.Н. Смирнов

Photoluminescence excitation spectra and photoluminescence kinetics in the structures with self-assembled Ge(Si) islands

A.N. Yablonskiy^{*,+}, *N.A. Baidakova*^{*,+},
A.V. Novikov^{*,+}, *D.N. Lobanov*^{*,+}, *M.V. Shaleev*^{*}

^{*} Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

⁺ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract In this work the spectral and temporal characteristics of photoluminescence originated from radiative recombination of charge carriers in multilayer SiGe/Si(001) structures with self-assembled Ge(Si) islands, have been studied. The time dependences of the photoluminescence from Ge(Si) islands have been studied in a wide range of time delay after the pump pulse at different levels of optical excitation. Photoluminescence excitation spectra of Ge(Si) islands in SiGe/Si(001) structures, corresponding to different components in the photoluminescence decay curves, have been studied in the spectral ranges of band-to-band and sub-bandgap optical pumping. A significant difference in the photoluminescence excitation spectra obtained for the fast (0–100 μ s) and slow (100 μ s–5 ms) component in the photoluminescence decay, has been revealed. It has been shown that a significant dependence of the photoluminescence excitation spectra of Ge(Si)/Si(001) islands on the optical pumping power is associated with a prolonged diffusion of nonequilibrium charge carriers from the bulk silicon layers to Ge(Si) islands at high excitation levels.