

Кинетика фотолюминесценции самоформирующихся Ge(Si) островков в многослойных структурах SiGe/Si и SiGe/SOI

© А.Н. Яблонский[†], Н.А. Байдакова, А.В. Новиков*, Д.Н. Лобанов

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

* Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2013 г. Принята к печати 30 апреля 2013 г.)

Представлены результаты исследования спектральных и временных характеристик фотолюминесценции многослойных структур с самоформирующимися Ge(Si) островками, выращенных на кремниевых подложках и подложках „кремний-на-изоляторе“, в зависимости от температуры и длины волны возбуждающего излучения. В структурах с Ge(Si) островками, выращенными на кремниевых подложках, обнаружено значительное возрастание интенсивности фотолюминесценции островков при увеличении температуры от 4 до 70 К, связанное с диффузией неравновесных носителей заряда из кремниевой подложки в активный слой с островками. При этом в кинетике нарастания фотолюминесценции островков возникает медленная компонента с характерным временем ~ 100 нс. В то же время в структурах, выращенных на подложках „кремний-на-изоляторе“, в которых активный слой с островками изолирован от кремниевой подложки слоем SiO₂, медленная компонента в кинетике нарастания фотолюминесценции островков отсутствует, и возрастание интенсивности фотолюминесценции с ростом температуры не наблюдается. Установлено, что поглощение возбуждающего излучения в островках и SiGe смачивающих слоях дает основной вклад в возбуждение сигнала фотолюминесценции островков в условиях подзонной оптической накачки.

1. Введение

Изучение оптических свойств низкоразмерных SiGe-структур представляет значительный интерес как с точки зрения фундаментальных научных исследований, так и в связи с возможностью практического использования SiGe-гетероструктур для создания элементов кремниевой оптоэлектроники. Среди известных типов SiGe-гетероструктур перспективными для реализации эффективных источников излучения ближнего инфракрасного диапазона являются структуры с самоформирующимися Ge(Si) наноструктурами, поскольку сигнал фото- и электролюминесценции таких структур в спектральной области 1.3–1.55 мкм наблюдается вплоть до комнатной температуры [1,2]. Кроме того, наблюдение в тех же структурах сигнала фотопроводимости в указанном спектральном диапазоне делает такие структуры перспективными для создания оптопары. Одним из необходимых условий создания на основе SiGe-структур эффективных оптоэлектронных устройств является определение физических механизмов поглощения света и излучательной рекомбинации носителей заряда в таких структурах. В настоящей работе представлены результаты исследования оптических свойств многослойных структур с самоформирующимися Ge(Si) островками, выращенных на кремниевых подложках и подложках „кремний-на-изоляторе“ (SOI), методами спектроскопии фотолюминесценции и спектроскопии возбуждения фотолюминесценции с наносекундным временным разрешением.

2. Эксперимент

Исследуемые структуры SiGe были выращены на подложках Si(001) и SOI методом молекулярно-пучковой эпитаксии из твердых источников при температуре 650°C и содержали 20 слоев самоформирующихся Ge(Si) наноструктур, разделенных слоями кремния толщиной 17–20 нм. Для получения одинаковых по размеру островков во всех слоях многослойной структуры количество осажденного германия варьировалось от 8.5 монослоев в первом слое до 7.5 монослоев в последнем (1 монослой — 0.14 нм) (см. подробности в [3]).

Измерение спектральных и временных зависимостей фотолюминесценции (ФЛ) осуществлялось при возбуждении структур импульсным излучением параметрического генератора света МОРО-SL (Spectra-Physics), перестраиваемым в широком спектральном диапазоне ($\lambda_{\text{ex}} = 0.44\text{--}1.4$ мкм). Длительность импульса излучения накачки составляла ~ 5 нс. Сигнал ФЛ регистрировался с помощью решетчатого монохроматора Acton 2300i (Acton Research), фотоэлектронного умножителя Hamamatsu H10330A-75 на основе InP/InGaAs (спектральный диапазон 0.93–1.7 мкм, время отклика ~ 2 нс) и цифрового осциллографа LeCroy. Измерения проводились с использованием заливного гелиевого криостата (РТИ, Черноголовка) в диапазоне температур от 4.2 до 70 К или в кварцевой колбе при температуре жидкого азота (77 К).

[†] E-mail: yablonsk@ipm.sci-nnov.ru

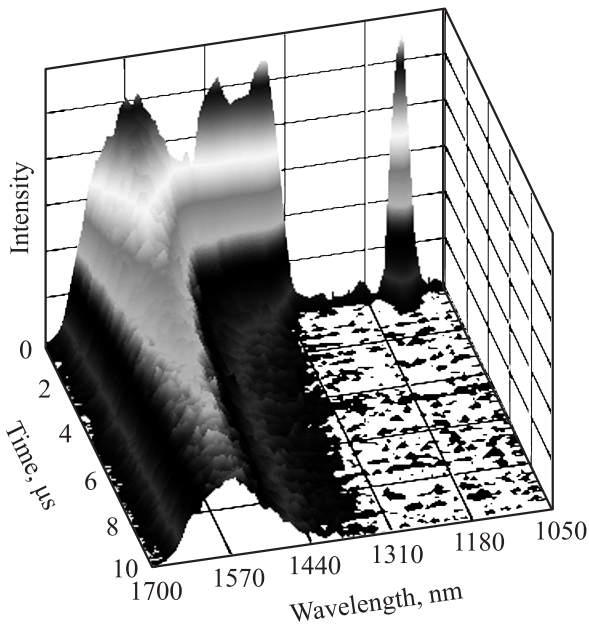


Рис. 1. Спектр ФЛ с временным разрешением структуры с Ge(Si) островками, выращенными на подложке Si(001). Спектр получен при температуре 70 К и длине волны возбуждения $\lambda_{ex} = 0.78$ мкм.

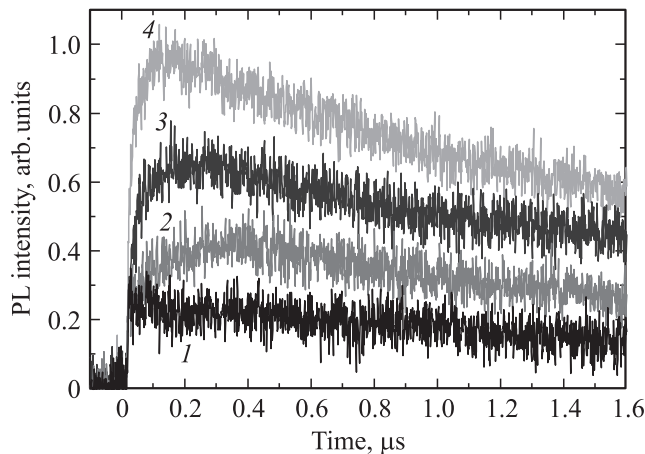


Рис. 2. Временные зависимости сигнала ФЛ Ge(Si)/Si(001) островков (на длине волны 1.57 мкм) при температурах 4.2 (1), 20 (2), 60 (3) и 70 К (4). Длина волны возбуждения $\lambda_{ex} = 0.78$ мкм.

3. Результаты и обсуждение

В многослойных структурах с самоформирующимися островками Ge(Si) были исследованы спектрокинетические зависимости сигнала ФЛ (спектры ФЛ с временным разрешением). Подробное описание методики получения данных спектров представлено в работе [4]. На рис. 1 приведен спектр ФЛ с временным разрешением структуры с Ge(Si)/Si(001) островками, полученный при температуре 70 К и длине волны возбуждающего излучения $\lambda_{ex} = 0.78$ мкм. В условиях

межзонного возбуждения в спектрах ФЛ исследованных структур наряду с линиями излучательной рекомбинации экситонов в матрице кремния (1.13 мкм) наблюдаются две спектрально разнесенные компоненты, характеризующиеся существенно различающимися временами спада интенсивности ФЛ. Широкая линия ФЛ в длинноволновой области спектра (1.45–1.7 мкм) с характерным временем спада до 100 мкс соответствует не прямой в пространстве излучательной рекомбинации дырок, локализованных в Ge(Si) островках, и электронов в Si-слоях на гетерогранице с островками [5,6]. В более коротковолновой области спектра (1.3–1.5 мкм) наблюдается сигнал ФЛ с временами спада 0.1–1 мкс, обусловленный, по-видимому, излучательной рекомбинацией носителей заряда в смачивающих слоях. Связь данной спектральной компоненты с излучательными переходами в SiGe смачивающих слоев подтверждается формой линии, состоящей из двух пиков, разнесенных на расстояние, близкое к энергии поперечного оптического фона в SiGe-структурах (49 мэВ) [7]. Наличие двух пиков, связанных с рекомбинацией носителей заряда без участия фононов и с испусканием оптического фона, является характерным для сигнала ФЛ, связанного с излучательными переходами в SiGe-квантовых ямах [7]. Спектральное положение как полосы ФЛ Ge(Si) островков, так и линии ФЛ SiGe смачивающих слоев зависит в первую очередь температурой роста Ge(Si) островков [8].

Для изучения процессов захвата носителей заряда в островки и их излучательной рекомбинации были исследованы временные зависимости ФЛ Ge(Si) островков при различных температурах (рис. 2). При низких температурах (4–10 К) сигнал ФЛ островков характеризуется быстрым временем нарастания, определяемым длительностью импульса оптической накачки (< 10 нс). При увеличении температуры до 60–70 К наблюдается

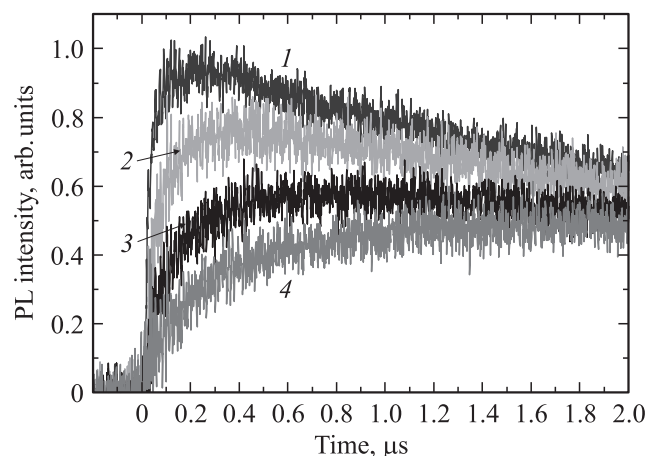


Рис. 3. Временные зависимости сигнала ФЛ Ge(Si)/Si(001) островков при возбуждении на длинах волн: $\lambda_{ex} = 0.44$ (1), 0.78 (2), 0.88 (3), 0.98 мкм (4). Зависимости получены при $T = 77$ К.

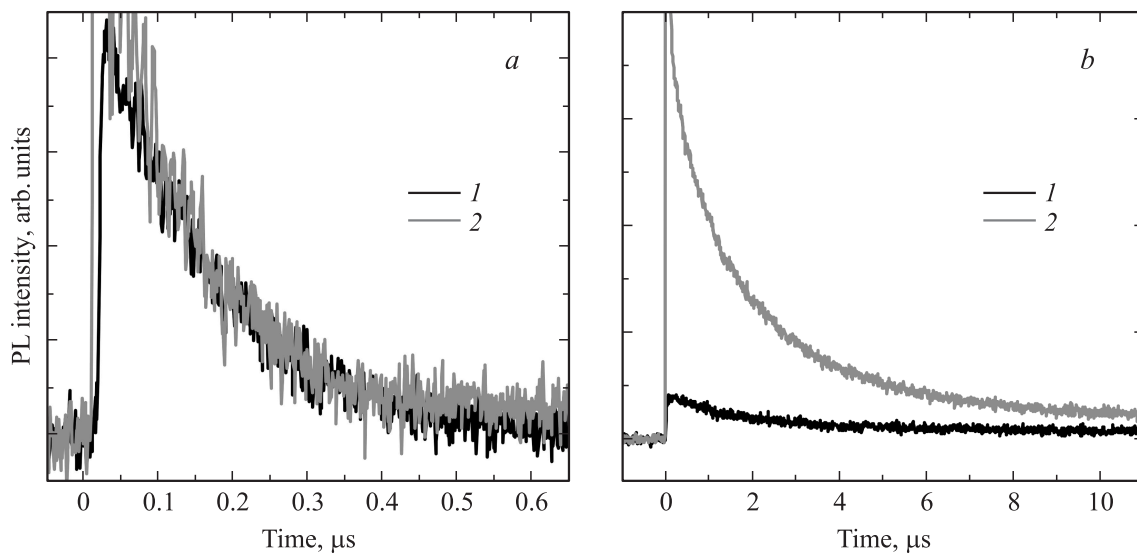


Рис. 4. Временные зависимости сигнала ФЛ экситонов (а) и Ge(Si) островков (b) при возбуждении на длинах волн $\lambda_{ex} = 0.9$ (1) и 1.26 мкм (2). Зависимости получены при $T = 4.2$ К.

значительное возрастание интенсивности ФЛ островков, при этом в кинетике ФЛ возникает участок медленного нарастания с характерным временем ~ 0.1 мкс. Полученный результат может быть объяснен в рамках следующей модели. В условиях межзонного оптического возбуждения основная часть излучения накачки поглощается в слоях кремния, окружающих Ge(Si) островки, а также в кремниевой подложке. При низких температурах (< 10 К) большая часть сгенерированных носителей заряда образует экситоны, которые связываются и рекомбинируют на мелких примесных центрах в кремнии. В результате только небольшая доля носителей заряда может быть захвачена островками. Повышение температуры приводит к снижению эффективности связывания экситонов на примесных центрах и, как следствие, их диффузии из кремниевой подложки в активный слой SiGe, что увеличивает вероятность их захвата в островки. Это приводит к возрастанию интенсивности ФЛ островков и возникновению медленной компоненты нарастания ФЛ.

Для проверки предложенной модели было проведено исследование кинетики ФЛ Ge(Si) островков при различных значениях длины волны оптического возбуждения в спектральном диапазоне $\lambda_{ex} = 0.44\text{--}0.98$ мкм (рис. 3). Как следует из зависимости коэффициента поглощения излучения в кремнии от длины волны, характерная глубина проникновения возбуждающего излучения в исследуемых структурах изменяется от 0.5 мкм при $\lambda_{ex} = 0.44$ мкм до 200 мкм при $\lambda_{ex} = 0.98$ мкм [9]. Поэтому доля излучения накачки, поглощаемая в кремниевой подложке, значительно возрастает с увеличением длины волны возбуждения. Это приводит к увеличению вклада в сигнал ФЛ Ge(Si) островков носителей заряда, генерируемых в Si-подложке и диффундирующих в активный слой с островками. В результате характерное время нарастания ФЛ островков значительно возрастает при

увеличении длины волны возбуждающего излучения (рис. 3).

Сделанный вывод подтверждается результатами измерений кинетики ФЛ островков в структурах, выращенных на подложках „кремний-на-изоляторе (SOI)“. В таких структурах активная область, содержащая островки, изолирована от кремниевой подложки слоем SiO₂, препятствующим диффузии носителей заряда из подложки в активный слой. В структурах SiGe/SOI медленная компонента нарастания в кинетических кривых сигнала ФЛ Ge(Si) островков отсутствовала как при низких (< 10 К), так и при повышенных (20–70 К) температурах, и возрастание интенсивности ФЛ островков с ростом температуры не наблюдалось.

Ранее в структурах SiGe/Si с Ge(Si) островками были исследованы спектры возбуждения ФЛ (зависимости интенсивности ФЛ от длины волны возбуждения) островков и SiGe смачивающих слоев, а также спектры возбуждения межзонной (экситонной) ФЛ [4,10]. Было показано, что сигнал ФЛ островков наблюдается как при межзонном возбуждении, так и при энергиях кванта возбуждающего излучения, существенно меньших ширины запрещенной зоны кремния ($\lambda_{ex} > 1.06$ мкм). Для установления механизма возбуждения ФЛ Ge(Si) островков при подзонной оптической накачке в данной работе было проведено сравнение сигналов экситонной и островковой ФЛ, наблюдаемых при межзонном ($\lambda_{ex} = 0.9$ мкм) и подзонном ($\lambda_{ex} = 1.26$ мкм) оптическом возбуждении. Мощность оптической накачки при различных λ_{ex} выбиралась таким образом, чтобы обеспечить одинаковую интенсивность экситонной ФЛ (рис. 4, а), т.е. одинаковое количество экситонов, генерируемых в исследуемой структуре. Было обнаружено, что при этом интенсивность ФЛ Ge(Si) островков в условиях подзонного возбуждения на порядок превышает интенсивность ФЛ островков при межзонной накачке (рис. 4, б). Получен-

ный результат означает, что в отличие от межзонной накачки, при которой ФЛ островков обусловлена в первую очередь захватом носителей заряда, сгенерированных в кремниевой матрице, при подзонной накачке основную роль в процессе возбуждения ФЛ Ge(Si) островков играет поглощение возбуждающего излучения непосредственно в островках и SiGe смачивающих слоях.

4. Заключение

В многослойных структурах с самоформирующимися Ge(Si) островками, выращенными на подложках Si(001) и SOI, исследованы спектральные и временные характеристики ФЛ островков в зависимости от температуры и длины волны возбуждающего излучения. Показано, что при низких температурах (< 10 К) сигнал ФЛ островков связан с рекомбинацией носителей заряда, сгенерированных в эпитаксиальном слое в окрестности островков. В структурах с островками, выращенными на подложках Si(001), обнаружено значительное возрастание интенсивности ФЛ островков при увеличении температуры от 4 до 70 К, которое связывается с диффузией неравновесных носителей заряда из кремниевой подложки в активный слой с островками. При этом в кинетике нарастания сигнала ФЛ островков возникает медленная компонента с характерным временем ~ 100 нс. В то же время в структурах, выращенных на подложках „кремний-на-изоляторе“, в которых активный слой с островками изолирован от кремниевой подложки слоем SiO₂, медленная компонента в кинетике нарастания ФЛ островков отсутствует, и возрастания интенсивности ФЛ с ростом температуры не наблюдается. Установлено, что поглощение возбуждающего излучения в Ge(Si) островках и SiGe смачивающих слоях дает основной вклад в возбуждение сигнала ФЛ островков в условиях подзонной оптической накачки.

Работа выполнена при поддержке программ РАН, РФФИ (12-02-31456-мол), РФФИ-поволжье и Совета по грантам президента РФ (СП-6523.2013.5), часть исследований выполнена с использованием оборудования УСУ „Фемтоспектр“.

Список литературы

- [1] V.G. Talalaev, G.E. Cirilin, A.A. Tonkikh, N.D. Zakharov, P. Werber. *Phys. Status Solidi*, **198**, R4 (2003).
- [2] D.N. Lobanov, A.V. Novikov, K.E. Kudryavtsev et al. *Physica E*, **41**, 935 (2009).
- [3] Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasilnik, K.E. Kudryavtsev, D.N. Lobanov, A.V. Novikov et al. *Semiconductors*, **42**, 286 (2008).
- [4] Н.А. Байдакова, А.В. Новиков, Д.Н. Лобанов, А.Н. Яблонский. *Письма ЖТФ*, **38** (18), 7 (2012).
- [5] S. Fukatsu, H. Sunamura, Y. Shiraki, S. Komiyama. *Thin Sol. Films*, **321**, 65 (1998).
- [6] В.Я. Алешкин и др. *Письма ЖЭТФ*, **67**, 46 (1998).
- [7] O.G. Schmidt, M. Gail, C. Lange, K. Eberl. *Phys. Status Solidi B*, **215**, 319 (1999).
- [8] Н.В. Востоков, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, М.В. Шалеев, А.Н. Яблонский. *ФТТ*, **46** (1), 63 (2004).
- [9] W.C. Dash, R. Newman. *Phys. Rev.*, **99**, 1151 (1955).
- [10] Н.А. Байдакова, А.В. Новиков, Д.Н. Лобанов, А.Н. Яблонский. *Тр. XVI Междунар. симп. „Нанопизика и нанозлектроника“* (2012), с. 191.

Редактор Т.А. Полянская

Time-resolved photoluminescence of self-assembled Ge(Si) islands in multilayer SiGe/Si and SiGe/SOI structures

A.N. Yablonskiy, N.A. Baidakova, A.V. Novikov, D.N. Lobanov*

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia
* Physical Technical Research Institute,
University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The paper presents the results of a study of the spectral and temporal characteristics of the photoluminescence in multilayer structures with self-assembled Ge(Si) islands grown on silicon and „silicon-on-insulator“ substrates, depending on the temperature and excitation wavelength. In the structures with Ge(Si) islands grown on silicon substrates a significant increase in the PL intensity of the islands has been observed with increasing temperature from 4 to 70 K, due to the diffusion of nonequilibrium charge carriers from the silicon substrate into the active layer with islands. This was accompanied by appearance of a slow component in the rise kinetics of the island photoluminescence with characteristic time of ~ 100 ns. At the same time, in the structures grown on „silicon-on-insulator“ substrates, in which the active layer with islands is isolated from the silicon substrate with SiO₂ layer, the slow component in the rise kinetics of island photoluminescence was absent, and the increase in the PL intensity with increasing temperature was not observed. It has been shown that the direct absorption of the pumping radiation in the islands and SiGe wetting layers makes the main contribution to the excitation of photoluminescence signal of the islands under sub-bandgap optical pumping.