

Особенности спектров возбуждения и кинетики фотолюминесценции структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с релаксированным гетерослоем

© Л.В. Красильникова[¶], А.Н. Яблонский, М.В. Степихова, Ю.Н. Дроздов, В.Г. Шенгуров*, З.Ф. Красильник

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 20 апреля 2010 г. Принята к печати 20 апреля 2010 г.)

Проведено исследование люминесцентных свойств гетероэпитаксиальных структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с релаксированным гетерослоем. По результатам совместных исследований спектров возбуждения и кинетики фотолюминесценции (ФЛ) выделены компоненты, вносящие преимущественный вклад в сигнал фотолюминесценции структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ в диапазоне длин волн 1.54 мкм. Показано, что релаксация упругих напряжений в гетерослое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$ слабо влияет на кинетические характеристики эрбиевой люминесценции и проявляется лишь в незначительном вкладе в люминесцентный отклик структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ дефектов и дефектно-примесных комплексов. В спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ выделены особенности, связанные с возможностью возбуждения редкоземельной примеси при энергиях, меньших ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Показано, что в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ в области длин волн 1040–1050 нм наблюдается пик, ширина которого зависит от ширины запрещенной зоны твердого раствора и степени его релаксации. Наблюдаемые особенности объясняются вовлеченностью в процесс возбуждения иона Er^{3+} промежуточных уровней в запрещенной зоне твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$.

1. Введение

Интерес к структурам $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ вызван прежде всего возможностью создания эффективных источников излучения на их основе. Можно показать, что введение германия в активный слой позволяет формировать в структурах этого типа эффективный волновод, степень локализации оптических мод (Γ) в котором достигает 98% [1]. Максимальная локализация оптических мод в гетерослоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$ имеет место при высоком содержании германия и большой толщине активного слоя, что на практике реализуется фактически только в релаксированных структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$. В этой связи представляет интерес исследование люминесцентных свойств примеси Er^{3+} и особенностей люминесцентного отклика структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с релаксированными гетерослоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$.

В настоящей работе представлены результаты исследований спектров возбуждения и кинетик эрбиевой и дефектной компонент фотолюминесценции (ФЛ) в эпитаксиальных структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с содержанием германия, варьируемом в диапазоне от 10 до 31%. В исследованных структурах величина остаточных упругих деформаций (RES), характеризующая степень релаксации гетероэпитаксиальных слоев, изменялась от 82 до 4%.

2. Методика эксперимента

Исследуемые в работе структуры $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ были выращены методом сублимационной

[¶] E-mail: Luda@ipm.sci-nnov.ru

молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в атмосфере германа (GeH_4) [2]. Как и в случае стандартной методики сублимационной МЛЭ, при формировании активного слоя поток атомов Er создавался испарением поликристаллического источника Si, легированного эрбием. Образцы выращивались на подложках c-Si марки КЭФ-4.5 с ориентацией (100). Процессу роста слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$ предшествовало формирование буферного слоя c-Si толщиной ~ 0.2 мкм. Толщина покровного слоя кремния, выращивавшегося поверх активных гетерослоев, составляла 100–200 нм. Структурные свойства и элементный состав выращенных структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ анализировались методами рентгеновской дифракции (РД) и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Как показали результаты исследований методом ВИМС, распределение примеси эрбия в слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$ носит однородный характер с концентрацией $\sim (0.7-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Структурные параметры исследованных в данной работе образцов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ приведены в таблице. Как видно из таблицы, толщина исследованных гетероэпитаксиальных слоев (d_{SiGeEr} , d_{SiGe}) варьировалась от 0.4 до 2.6 мкм. Содержание Ge (x) в гетерослоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ варьировалось от 10 до 31%, относительная величина остаточных упругих деформаций изменялась от 82 до 4%. Вместо величины RES можно также ввести связанную с ней величину степени релаксации решетки гетерослоя, R , которая будет определяться формулой $R(\%) = 100 - \text{RES}$.

Для исследования спектров возбуждения и кинетики ФЛ в структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ использовался оптический параметрический генератор света МОРО-SL (Spectra-Physics) с накачкой импульсным ла-

Параметры исследованных структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$

Номер структуры	Содержание германия x , %	Толщина гетерослоя $d_{\text{SiGeEr}}, d_{\text{SiGe}}$, мкм	Величина остаточных упругих деформаций RES, %	Легирование эрбием
1	11	0.4	82	+
2	23	2.6	6	+
3	31	2.1	9	+
4	26	1.8	4	-

зером Nd : YAG (длительность импульсов возбуждающего излучения ~ 5 нс, частота повторения импульсов — 10 Гц). Регистрация сигнала ФЛ с наносекундным временным разрешением осуществлялась с помощью решеточного спектрометра Acton 2300i, фотоэлектронного умножителя на основе InP/InGaAs (Hamamatsu, рабочий диапазон 0.95–1.7 мкм) и цифрового осциллографа WS 432 (Le Croy). Спектры возбуждения и кинетики эрбиевой и дефектной компонент ФЛ изучались в структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ в диапазоне длин волн возбуждающего излучения $\lambda_{\text{ex}} = 700\text{--}1300$ нм при температурах 16 и 77 К.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Типичные кинетические зависимости сигнала ФЛ, полученные для релаксированных гетероэпитаксиальных структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ при разных условиях возбуждения, приведены на рис. 1 и 2. Как показали результаты исследований, спад сигнала ФЛ гетероструктур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ на длине волны 1.54 мкм характеризу-

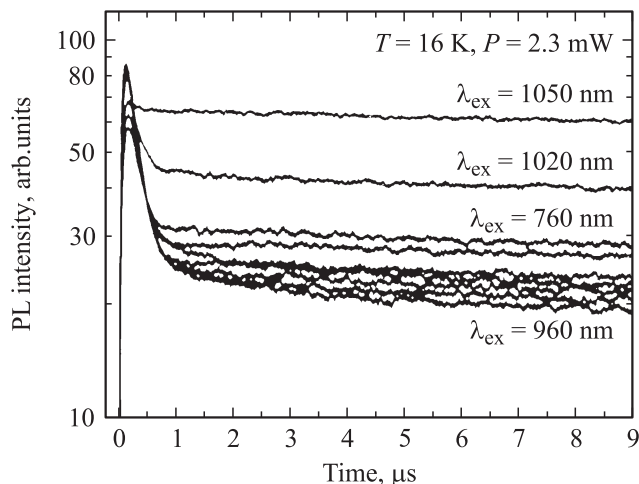


Рис. 1. Кинетика ФЛ структуры $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с содержанием германия 31%, $d_{\text{SiGeEr}} = 2.1$ мкм, RES = 9%. Сигнал ФЛ детектировался на длине волны 1.54 мкм во временном интервале от 0 до 10 мкс ($T = 16$ К). Измерения проводились в диапазоне длин волн возбуждающего излучения $\lambda_{\text{ex}} = 760\text{--}1050$ нм.

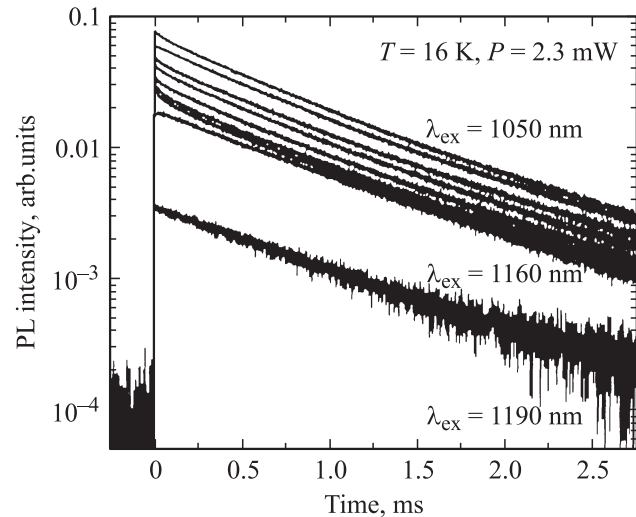


Рис. 2. Кинетика ФЛ структуры $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с $x = 31\%$, $d_{\text{SiGeEr}} = 2.1$ мкм, RES = 9%. Сигнал ФЛ детектировался на длине волны 1.54 мкм во временном интервале от 10 мкс до 2.5 мс ($T = 16$ К). Измерения проводились в диапазоне длин волн возбуждающего излучения $\lambda_{\text{ex}} = 750\text{--}1190$ нм.

ется экспоненциальной зависимостью с двумя временами затухания. Во временном интервале до 10 мкс в люминесцентный отклик структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ существенный вклад вносят коротковременные компоненты с временами затухания $\tau \approx 1$ мкс (рис. 1). Наличие этих компонент в кинетике ФЛ релаксированных гетерослоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$, очевидно, можно связать с присутствием в исследованных структурах дефектов и дефектно-примесных комплексов. Во временном интервале от 10 мкс до 10 мс преобладающий вклад в люминесцентный отклик структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ на длине волны 1.54 мкм вносят компоненты, связываемые с редкоземельной примесью эрбия. Кинетика фотолюминесценции ионов Er^{3+} в структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с высокой степенью релаксации упругих напряжений (RES = 6–9%) и большой толщиной активного гетерослоя (более 1 мкм) описывается типичными для редкоземельной примеси [3] временами затухания, $\tau \approx 0.8\text{--}1$ мс (рис. 2). Последнее, очевидно, свидетельствует о незначительной роли безызлучательных каналов рекомбинации и слабом влиянии процессов релаксации упругих напряжений в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$ на временные ха-

рактеристики затухания эрбиевой ФЛ. Следует также отметить, что коротковременные компоненты сигнала ФЛ, выделенные в результате исследований кинетик ФЛ во временном интервале до 10 мкс, по интенсивности сигнала на несколько порядков величины меньше люминесцентного отклика редкоземельной примеси. На рис. 3 в качестве примера приведены спектры фотолюминесценции коротковременных компонент сигнала ($\tau \approx 1$ мкс), а также эрбиевой компоненты фотолюминесценции ($\tau \approx 0.8-1$ мс), измеренные в структуре $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с $x = 31\%$, $d_{\text{SiGeEr}} = 2.1$ мкм и $\text{RES} = 9\%$. Как видно из рисунка, при температуре 77 К и длине волны возбуждающего излучения $\lambda_{\text{ex}} = 800$ нм сигнал ФЛ эрбиевой компоненты в данном образце почти на 3 порядка величины превышает сигнал коротковременной компоненты.

На рис. 4 представлены результаты исследований спектров возбуждения коротковременной компоненты сигнала ФЛ на длине волны 1.54 мкм, которая может быть связана с дефектами в структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$. Для сравнения на рисунке приведены также спектры

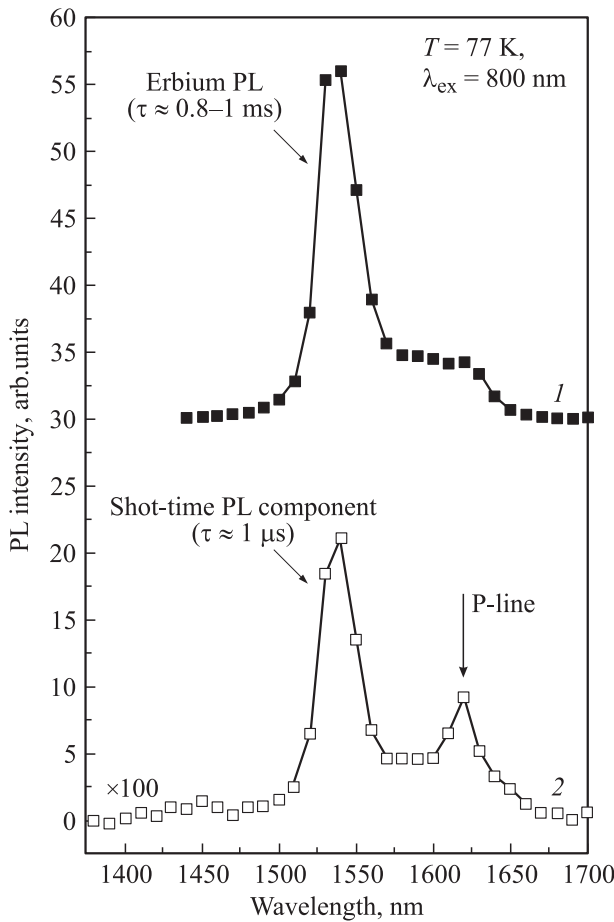


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции структуры $\text{Si}_{0.69}\text{Ge}_{0.31} : \text{Er}/\text{Si}$, полученные из анализа кинетик сигнала фотолюминесценции в условиях возбуждения на длине волны 800 нм ($T = 77$ К): 1 — спектр эрбиевой компоненты ФЛ. 2 — спектр коротковременной компоненты ФЛ.

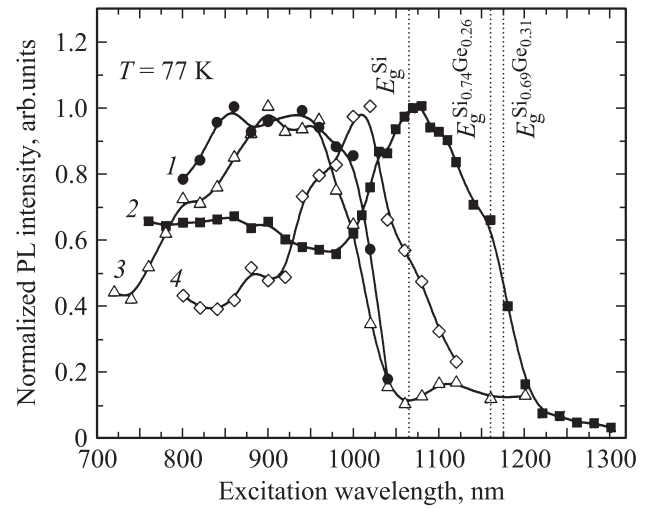


Рис. 4. Нормированные спектры возбуждения дефектной и эрбиевой компонент ФЛ в структурах $\text{Si}_{0.74}\text{Ge}_{0.26}/\text{Si}$ и $\text{Si}_{0.69}\text{Ge}_{0.31} : \text{Er}/\text{Si}$, полученные при $T = 77$ К: 1 — спектр коротковременной компоненты ФЛ, наблюдаемой на длине волны 1540 нм в структуре $\text{Si}_{0.69}\text{Ge}_{0.31} : \text{Er}/\text{Si}$, 2 — спектр линии эрбиевой люминесценции в структуре $\text{Si}_{0.69}\text{Ge}_{0.31} : \text{Er}/\text{Si}$, 3 — спектр линии ФЛ D1 в структуре $\text{Si}_{0.74}\text{Ge}_{0.26}/\text{Si}$, 4 — спектр P-линии ФЛ в структуре $\text{Si}_{0.69}\text{Ge}_{0.31} : \text{Er}/\text{Si}$.

возбуждения эрбиевой компоненты ФЛ. Из рисунка видно, что спектр возбуждения коротковременной компоненты ФЛ в структуре с $x = 31\%$, $d_{\text{SiGeEr}} = 2.1$ мкм и $\text{RES} = 9\%$ (спектр 1 на рис. 4) смещен по отношению к спектру возбуждения эрбиевой ФЛ (спектр 2 на рис. 4) в коротковолновую область. Сигнал коротковременной компоненты ФЛ с временами затухания $\tau \approx 1$ мкс не наблюдается при энергиях кванта возбуждающего излучения, меньших ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследований спектров возбуждения так называемой P-линии фотолюминесценции, наблюдаемой в структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ и связываемой с дефектно-примесными комплексами с участием углерода и кислорода (энергия излучательного перехода 767 мэВ) [4], а также с результатами исследований спектров возбуждения ФЛ структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с релаксированным гетерослоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, не легированным примесью эрбия, в котором сигнал ФЛ имеет преимущественно дислокационную природу. Рассмотрим эти результаты более подробно на примере гетероструктур $\text{Si}_{0.74}\text{Ge}_{0.26}/\text{Si}$ и $\text{Si}_{0.69}\text{Ge}_{0.31} : \text{Er}/\text{Si}$, исследованных при температуре 77 К. В спектрах фотолюминесценции структуры $\text{Si}_{0.69}\text{Ge}_{0.31} : \text{Er}/\text{Si}$ при энергии кванта возбуждающего излучения, соответствующей межзонному переходу, в области длины волны 1535 нм наблюдается интенсивный максимум люминесценции, связанной с основным излучательным переходом $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ в 4f-оболочке иона Er^{3+} , характеризующийся временами затухания $\tau \approx 0.8-1$ мс (рис. 3). Стрелкой на рисунке

с обозначением „P-line“ показано положение Р-линии фотолюминесценции. Р-линия люминесценции на длине волны ~ 1615 нм наблюдается в спектрах ФЛ структуры $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ одновременно с компонентами ФЛ, имеющими максимум на длине волны 1540 нм с временами затухания ~ 1 мкс. Времена затухания обеих этих компонент фотолюминесценции лежат во временном интервале менее 10 мкс. Структура $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$, не легированная эрбием, выращивалась с толщиной гетерослоя $d_{\text{SiGe}} = 1.8$ мкм и высоким содержанием германия в нем ($x = 26\%$), что, как следствие, приводит к сильной релаксации. Величина RES в выращенной структуре составляла 4%. Преобладающий вклад в сигнал ФЛ структуры $\text{Si}_{0.74}\text{Ge}_{0.26}/\text{Si}$ вносит интенсивная линия люминесценции на длине волны 1550 нм. Наблюдаемая линия (линия D1) принадлежит хорошо известной серии линий D1–D4, имеющей дислокационную природу [5–8]. Положение D-линий в спектрах фотолюминесценции зависит от содержания германия в слое твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и сдвигается в более низкоэнергетическую область при его увеличении [9]. Положение линии D1 в спектре ФЛ обсуждаемой структуры $\text{Si}_{0.74}\text{Ge}_{0.26}/\text{Si}$ смещено относительно спектрального положения линии D1 в кремнии [4] на величину ~ 7 мэВ и коррелирует с параметрами исследуемого гетерослоя. Приведенный на рис. 4 спектр возбуждения фотолюминесценции, полученный для линии D1 (спектр 3 на рис. 4), существенно отличается от спектра возбуждения эрбиевой компоненты ФЛ (спектр 2 на рис. 4). Положение максимума в спектрах возбуждения ФЛ как для D1-, так и для Р-линий (спектр 4 на рис. 4) фотолюминесценции смещено по отношению к максимуму, наблюдаемому в спектрах возбуждения эрбиевой компоненты, в область больших энергий. Сигнал ФЛ, связываемый с дефектно-примесными и дислокационными компонентами в структурах $\text{Si}_{0.69}\text{Ge}_{0.31} : \text{Er}/\text{Si}$ и $\text{Si}_{0.74}\text{Ge}_{0.26}/\text{Si}$, не наблюдается при энергиях кванта возбуждающего излучения, меньших ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Наблюдаемые особенности в спектрах возбуждения коротковременных компонент ФЛ на длине волны 1.54 мкм, их корреляция со спектрами возбуждения известных линий ФЛ дефектно-примесной и дислокационной природы, а также спектральное положение и временные характеристики, очевидно, свидетельствуют в пользу высказанного предположения о дефектной природе коротковременного отклика в релаксированных структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$. Однако, как уже указывалось выше, вклад этих компонент существенно меньше люминесцентного отклика, связанного с редкоземельной примесью.

Рассмотрим особенности, наблюдаемые в спектрах возбуждения сигнала ФЛ, связываемого с редкоземельной примесью. Результаты исследований спектров возбуждения эрбиевой ФЛ в эпитаксиальных структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с содержанием германия от 10 до 31% приведены на рис. 5. Стрелками на рисунке показано положение ширины запрещенной зоны для гетерослоев

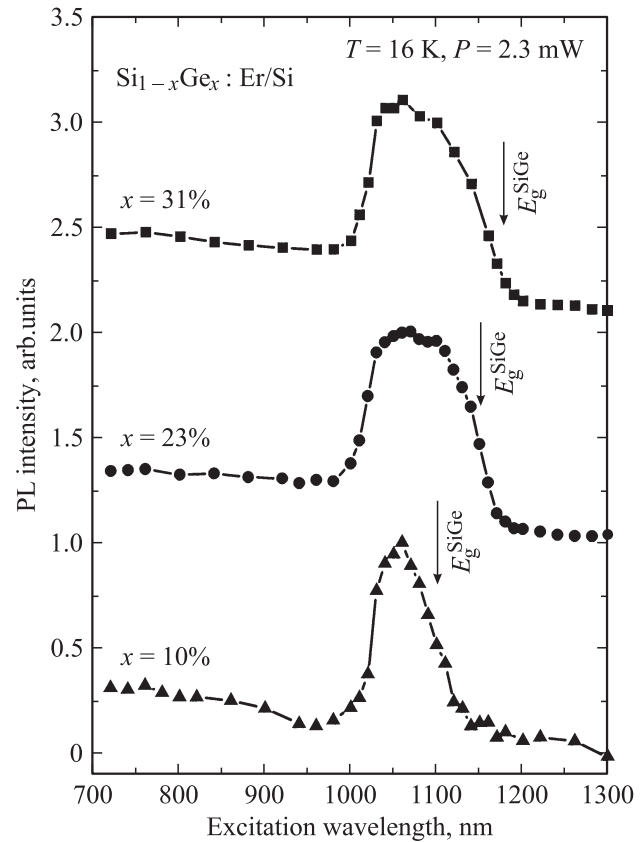


Рис. 5. Спектры возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с содержанием германия, варьирующимся в диапазоне от 10 до 31%. Стрелками на рисунке показано положение ширины запрещенной зоны гетерослоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$. При расчете значения ширины запрещенной зоны учитывалось содержание германия в гетерослое, степень релаксации и температура, при которой проводились измерения ($T = 16$ К).

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$ с соответствующими значениями x . Изменению содержания германия в диапазоне 10–31% соответствует изменение ширины запрещенной зоны гетерослоя от 1.13 ($x = 10\%$) до 1.04 эВ ($x = 31\%$). Интересно, что во всех исследованных структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с $x = 10$ –31% значительный сигнал эрбиевой ФЛ наблюдается как при условии межзонного возбуждения, так и при энергиях кванта возбуждающего излучения, существенно меньших ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. В области длин волн 1040–1050 нм в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ наблюдается максимум. Аналогичный пик в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ на длине волны ~ 1040 нм наблюдался в структурах $\text{Si} : \text{Er}/\text{Si}$ [10–12]. При уменьшении ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и уменьшении величины RES, ширина максимума в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ изменяется. При изменении ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ от 1.13 ($x = 10\%$) до 1.04 ($x = 31\%$) ширина максимума в спектрах возбуждения эрбиевой

ФЛ на уровне 0.5 от его максимальной интенсивности увеличивается от 85 до 142 мЭВ. При изменении структурных параметров гетерослоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ меняется и степень их структурного совершенства. Самая большая в серии исследованных структур ширина максимума в области длин волн 1040–1050 нм в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ наблюдается в структурах с практически полной релаксацией упругих напряжений. Возникновение сигнала эрбиевой люминесценции при возбуждении квантами света с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, и увеличение ширины наблюдаемого в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ максимума может быть объяснено, аналогично [10], существованием примесно-дефектных (связанных, в частности, с внедрением иона эрбия) либо дефектных уровней в запрещенной зоне полупроводника и их участием в процессе возбуждения. В этом случае поглощение кванта света с энергией $h\nu_{\text{ex}} < E_g$ может приводить к возбуждению электронов из валентной зоны непосредственно на энергетические уровни в запрещенной зоне и к их последующей безызлучательной рекомбинации с передачей энергии ионам Er^{3+} . В пользу этой гипотезы говорит описанная выше взаимосвязь ширины максимума, наблюдаемого в спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ, и степени релаксации упругих напряжений в гетероструктурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$. Здесь неясным остается совпадение участка резкого роста интенсивности эрбиевой фотолюминесценции в структурах $\text{Si} : \text{Er}/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ в области длин волн возбуждающего излучения 1000–1050 нм, по энергетическому положению соответствующих приближению к краю запрещенной зоны кремния. Очевидно, этот вопрос требует дополнительных детальных исследований.

4. Заключение

Таким образом, в работе проведено исследование люминесцентных свойств гетероэпитаксиальных структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с относительной величиной остаточных упругих деформаций от 82 до 4%. По результатам совместных исследований кинетики и спектров возбуждения ФЛ выделены компоненты, вносящие преимущественный вклад в сигнал люминесценции структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ в области длины волны 1.54 мкм. Выявлены компоненты, связываемые с редкоземельной примесью, дефектными и дефектно-примесными комплексами, имеющими место в релаксированных слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}$. Показано, что в структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ с высокой степенью релаксации ($\text{RES} \approx 6\text{--}9\%$) и толщинами слоев порядка или более 1 мкм компоненты ФЛ, связываемые с присутствием в структурах дефектов и дефектно-примесных комплексов, вносят лишь незначительный вклад в сигнал ФЛ.

По результатам проведенных исследований показано, что в структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ значительный сигнал

эрбиевой ФЛ наблюдается как при межзонном возбуждении, так и при энергиях кванта возбуждающего излучения, существенно меньших ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. В спектрах возбуждения эрбиевой ФЛ в структурах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x : \text{Er}/\text{Si}$ в области длин волн 1040–1050 нм обнаружен максимум, ширина которого возрастает с уменьшением ширины запрещенной зоны $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и с увеличением степени релаксации гетерослоя. Наблюдаемые особенности спектров возбуждения эрбиевой ФЛ предположительно связаны с участием в процессах возбуждения иона Er^{3+} промежуточных уровней в запрещенной зоне полупроводника.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы. Авторы выражают благодарность Б.Я. Беру за проведение исследований структур методом ВИМС.

Список литературы

- [1] M.V. Stepihova, L.V. Krasil'nikova, Z.F. Krasil'nik, V.G. Shengurov, V.Yu. Chalkov, S.P. Svetlov, D.M. Zhigunov, V.Yu. Timoshenko, O.A. Shalygina, P.K. Kashkarov. *J. Cryst. Growth*, **288**, 65 (2006).
- [2] V.A. Tolomasov, L.K. Orlov, S.P. Svetlov, R.A. Rubtsova, A.D. Gudkova, A.V. Kornaukhov, A.V. Potapov, Y.N. Drozdov. *Crystallography Reports*, **43** (3), 493 (1998).
- [3] A. Polman. *J. Appl. Phys.*, **82** (1), 1 (1997).
- [4] G. Davies. *Physics Reports (Review Section of Phys. Lett.)*, **176** (3–4), 83 (1989) North-Holland, Amsterdam.
- [5] V.V. Kveder, E.A. Steinman, H.G. Grimmeiss. *J. Appl. Phys.*, **78**, 446 (1995).
- [6] L.P. Tilly, P.M. Mooney, J.O. Chu, F.K. LeGoues. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 2488 (1995).
- [7] A. Souifi, T. Benyattou, G. Guillot, G. Bremond D. Dutartre, P. Warren. *J. Appl. Phys.*, **78**, 4039 (1995).
- [8] G. Bremond, A. Souifi, T. Benyattou, D. Dutartre. *Thin Sol. Films*, **222**, 60 (1992).
- [9] K. Tanaka, M. Suezawa, I. Yonenaga. *J. Appl. Phys.*, **80**, 6991 (1996).
- [10] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, Д.И. Крыжков, А.Н. Яблонский, В.П. Кузнецов, Т. Gregorkiewicz, M.A.J. Klik. *ФТТ*, **46** (1), 98 (2004).
- [11] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, А.Н. Яблонский, В.П. Кузнецов, Т. Gregorkiewicz, M.A.J. Klik. *ФТТ*, **47** (1), 83 (2005).
- [12] A.N. Yablonskiy, M.A.J. Klik, B.A. Andreev, V.P. Kuznetsov, Z.F. Krasilnik, T. Gregorkiewicz. *Optical Materials*, **27** (5), 890 (2005).

Редактор Т.А. Полянская

Features of the excitation spectra and kinetics of photoluminescence $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$: Er/Si structures with relaxed heterolayers

L.V. Krasilnikova, A.N. Yablonskiy, M.V. Stepikhova, Yu.N. Drozdov, V.G. Shengurov, Z.F. Krasilnik*

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

Abstract We have performed a study of luminescent properties of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$: Er/Si heteroepitaxial structures with relaxed heterolayers. As a result of joint research excitation spectra and kinetics of the photoluminescence (PL) color components, which make the main contribution to the photoluminescence $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$: Er/Si structures in the wavelength range of $1.54\ \mu\text{m}$. It is shown that the relaxation of elastic stresses in heterolayer $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$: Er has little effect on the kinetic characteristics of erbium luminescence and shows only in small contribution to the luminescent response of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$: Er/Si structures defect-impurity complexes. In the excitation spectra of the erbium PL highlighted features associated with the possibility of excitation of rare-earth impurities at energies below the band-gap of the $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ solid solution. It is shown that the excitation spectra of erbium PL in the $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$: Er/Si structures in the wavelength range 1040–1050 nm peak is observed, whose width depends on the band-gap of the solid solution and the degree of relaxation. The observed features due to involvement in the Er^{3+} ion excitation process intermediate levels in the band-gap of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$: Er solid solution.