

# Анализ коэффициента усиления и исследование люминесцентных свойств гетероструктур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ , полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в газовой фазе

© Л.В. Красильникова, М.В. Степихова, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов,  
З.Ф. Красильник, В.Г. Шенгуров\*, В.Ю. Чалков\*, С.П. Светлов\*, О.Б. Гусев\*\*

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

\* Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета,  
603950 Нижний Новгород, Россия

\*\* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: luda@ipm.sci-nnov.ru

Приводятся результаты исследований структур  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ , выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в газовой фазе. Исследуемые структуры рассматриваются в качестве одного из вариантов структур для реализации лазера на  $\text{Si}/\text{Er}$ . Показано, что методом сублимационной МЛЭ в газовой фазе можно создавать эффективные светоизлучающие структуры, обнаруживающие интенсивный сигнал люминесценции на длине волны  $1.54\ \mu\text{m}$ . Для структур  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$  с параметрами, близкими к рассчитанным для создания структур лазерного типа, проведены структурный и элементный анализ, исследованы спектральные и кинетические особенности фотолюминесценции при температурах 4.2 и 77 К. Показано, что в слоях  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ , выращенных этим методом, доля оптически активных ионов  $\text{Er}^{3+}$  достигает  $\sim 10\%$  от полного содержания эрбиевой примеси. Согласно проведенным оценкам, значения коэффициентов оптического усиления в активных слоях  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$  ( $x = 0.1$  и  $0.02$ ) составили  $\sim 0.03$  и  $\sim 0.2\ \text{cm}^{-1}$ . Значительное увеличение коэффициента усиления в структурах этого типа возможно за счет направленного формирования изолированных оптически активных центров иона  $\text{Er}^{3+}$  с характерной тонкой структурой спектра люминесценции.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 02-02-16773, 04-02-17120) и INTAS (проекты N NANO-01-0444, 03-51-6486).

## 1. Введение

Структуры на основе кремния, легированного эрбием, вызывают значительный интерес исследователей, обусловленный прежде всего возможностью создания на их основе оптоэлектронных устройств для оптического диапазона  $1.54\ \mu\text{m}$  [1]. Излучательный переход редкоземельного иона  $\text{Er}^{3+}$  на этой длине волны совпадает с окном прозрачности кварцевого волокна, что открывает широкие перспективы для использования структур  $\text{Si}:\text{Er}$  в современных системах волоконно-оптической связи. Особое значение здесь приобретают поиск условий и разработка технологии создания структур лазерного типа.

Ранее нами демонстрировались преимущества методики сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) для выращивания высокоэффективных светоизлучающих структур на основе кремния, легированного эрбием [2,3]. В структурах  $\text{Si}/\text{Si}:\text{Er}$ , полученных этим методом, удается добиться рекордно узких спектральных линий люминесценции, что позволяет ожидать высокие значения коэффициента оптического усиления. Показано, что в слоях  $\text{Si}:\text{Er}$  с преобладанием в спектральном отклике фотолюминесценции (ФЛ) изолированных центров редкоземельного иона с полушириной спектральной линии  $0.1\ \text{cm}^{-1}$  ( $10\ \mu\text{eV}$  [4]) коэффициент оптического усиления должен достигать  $30\ \text{cm}^{-1}$  [2].

Необходимым условием для создания лазера на  $\text{Si}:\text{Er}$  является разработка эффективных волноводных структур, обеспечивающих локализацию излучения в активном слое. Одним из возможных вариантов структур этого типа являются гетероструктуры  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$  с активным волноведущим слоем  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ . Для оценки оптимальных параметров слоев  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$  приведем результаты расчета полных коэффициентов усиления в структурах  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$  в зависимости от толщины  $d_{\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}}$  и содержания германия  $x$  в слое  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$  (рис. 1). При расчетах предполагалось, что коэффициент усиления  $g$  в активных слоях  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ , так же как и для  $\text{Si}:\text{Er}$ , составляет  $\sim 30\ \text{cm}^{-1}$ . Коэффициент оптического ограничения электромагнитной волны  $\Gamma$  рассчитывался по формуле

$$\Gamma = \frac{(n_1^2 - n_2^2)d^2k_0^2}{2 + (n_1^2 - n_2^2)d^2k_0^2}. \quad (1)$$

Здесь  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления активного слоя  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$  и ограничивающих слоев  $\text{Si}$  соответственно,  $d$  — толщина активного слоя  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина волны излучения. Как видно из результата расчета (рис. 1), максимальные значения полных коэффициентов усиления в структурах этого типа достигаются при достаточно больших толщинах

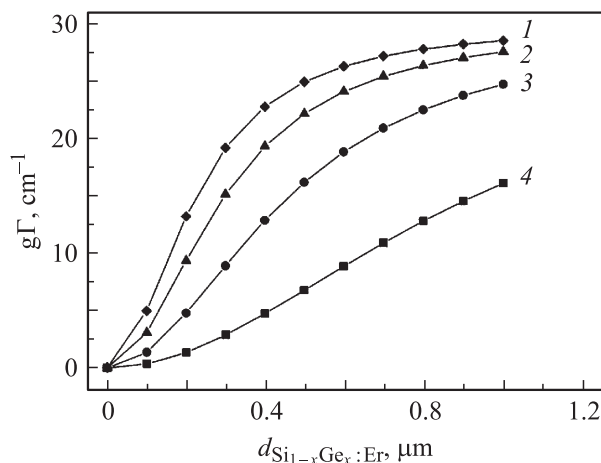
Условия роста и параметры структур Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si

Номер образца	Подложка	T <sub>гр</sub> , °C	x, %	d <sub>SiGe:Er</sub> , nm	RES, %	Источник Er	[Er], cm <sup>-3</sup>	d <sub>Si</sub> , nm
10-110	КДБ-02 (100)	500	9.74	500	57	poly-Si:Er	2 · 10 <sup>18</sup>	210
10-90	КДБ-02 (100)	500	8.73	500	100	»»»	3 · 10 <sup>18</sup>	520
10-71	КЭС-0.01 (111)	500	1.9	150	—	Металлич. Er / импл. O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2.2 · 10 <sup>17</sup>	350
37	КДБ-10 (100)	560	0	0	—	poly-Si:Er	5 · 10 <sup>18</sup>	1800

Примечание. T<sub>гр</sub> — температура роста, d<sub>SiGe:Er</sub> — толщина слоев Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er, RES — величины остаточных упругих напряжений, определяемые методом рентгеновской дифракции, d<sub>Si</sub> — толщина покровного слоя Si. Для образца № 37 толщина d<sub>Si</sub> соответствует толщине слоя Si:Er (структура Si/Si:Er). Образец № 10-71 дополнительно подвергнулся имплантации ионами кислорода.

слоев Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er (> 0.5 μm) и содержания германия в них, что, очевидно, может быть препятствием для роста совершенных структур. При больших толщинах и содержании Ge рост гетероэпитаксиальных слоев Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, как правило, носит метастабильный характер, происходит релаксация упругих напряжений в слоях Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> на кремнии, имеющих разные параметры решетки. Однако неясным остается вопрос о влиянии этих процессов на люминесцентные свойства редкоземельных ионов эрбия.

Целью данной работы является исследование люминесцентных свойств структур Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si, разрабатываемых для реализации лазера на кремнии. Структуры выращивались методом СМЛЭ в газовой фазе, специально предложенным для роста слоев твердого раствора SiGe:Er и представляющим собой модификацию СМЛЭ. В работе приводятся оценки концентрации оптически активных центров иона эрбия и коэффициентов усиления в этих структурах.



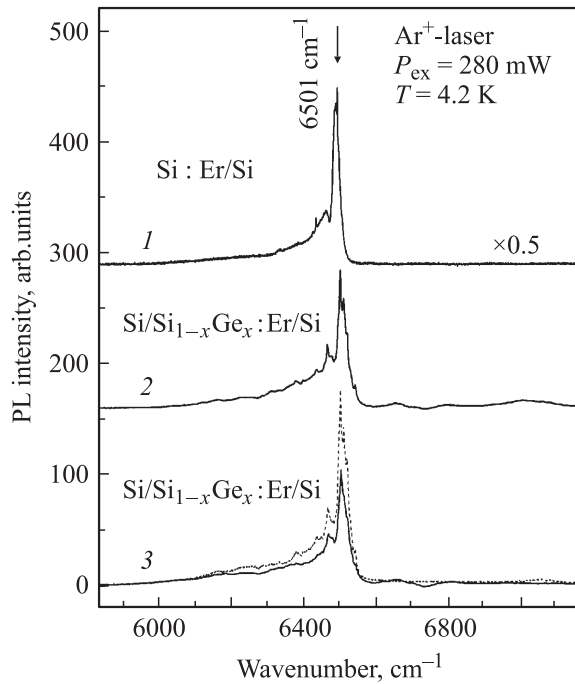
**Рис. 1.** Зависимость полного коэффициента усиления (gΓ) в структурах Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si от толщины активного слоя Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er (d<sub>Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er</sub>) и содержания Ge (x). x = 0.6 (1), 0.4 (2), 0.2 (3), 0.08 (4). При расчете полагалось, что значение оптического коэффициента усиления (g) в активном слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er составляет 30 см<sup>-1</sup>.

## 2. Методика эксперимента

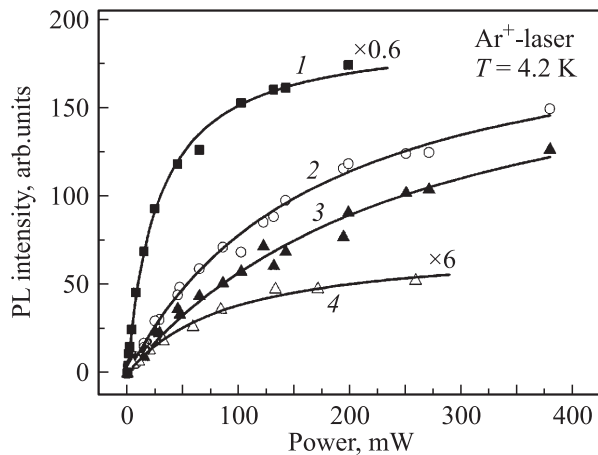
Исследованные структуры Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si выращивались методом СМЛЭ в атмосфере германа (GeH<sub>4</sub>). Спецификой метода является поступление германия в растущий слой за счет пиролиза GeH<sub>4</sub> на поверхности разогреваемой током кремниевой подложки (детально метод описан в работе [5]). Как и в случае стандартной методики СМЛЭ, для легирования слоев редкоземельной примесью использовались два типа источников: поликристаллический кремний, легированный эрбием, и металлические пластины Er. Условия роста и параметры наиболее характерных структур Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si, обсуждаемых далее, приведены в таблице. Для анализа структурных параметров и элементного состава выращенных эпитаксиальных слоев Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er использовались методики рентгеновской дифракции и вторичной ионной масс-спектрометрии. Фотолуминесцентные измерения структур проводились при температуре 4.2 К на Фурье-спектрометре BOMEM DA3 со спектральным разрешением ≥ 0.5 см<sup>-1</sup>. Сигнал ФЛ возбуждался Ar<sup>+</sup>-лазером с длиной волны излучения 514.5 nm и регистрировался охлаждаемым германиевым фотодетектором марки „North-Coast EO-817A“. Мощность возбуждающего излучения варьировалась от 2 до 380 mW. Временные зависимости ФЛ измерялись с помощью импульсного полупроводникового лазера, излучающего на длине волны 659 nm, и германиевого фотодетектора, используемого для регистрации сигнала. Измерения кинетики ФЛ проводились при T = 77 К на выделенной длине волны, соответствующей максимуму сигнала эрбиевой люминесценции, временное разрешение схемы регистрации 5 μs.

## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

При оптическом возбуждении в эпитаксиальных структурах Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si наблюдается эффективный сигнал ФЛ на длине волны 1.54 μm, связанный с внутрицентровыми переходами в 4f-оболочке



**Рис. 2.** Спектры ФЛ, полученные при идентичных условиях измерения в структурах Si:Er/Si и Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si. 1 — структура № 37, 2 — структура № 10-110, 3 — структура № 10-90. Пунктиром показан спектр ФЛ структуры № 10-90, отожженной при  $T = 800^{\circ}\text{C}$  в течение 30 min. Отжиг приводит к релаксации напряжений в слое Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er (по данным рентгеновской дифракции значение RES после отжига составило 50%), что проявляется в увеличении сигнала ФЛ.



**Рис. 3.** Зависимости интенсивности ФЛ структур Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si и Si:Er/Si от мощности возбуждающего излучения. 1 — структура № 37, 2 — структура № 10-110, 3 — структура № 10-90, 4 — структура № 10-71.

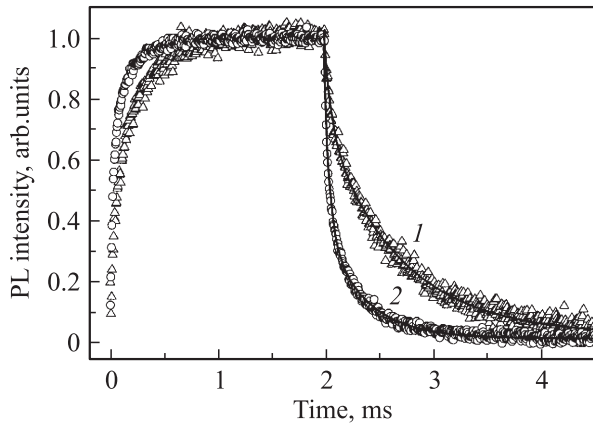
редкоземельного иона Er<sup>3+</sup> (переходы  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ). Фотолуминесцентный отклик исследованных структур при температуре 4.2 К приведен на рис. 2. Интенсивность сигнала ФЛ наиболее эффективных структур Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si оказывается сравнимой с интенсивно-

стью ФЛ однородно легированных слоев Si:Er. Для сравнения на этом рисунке приведен измеренный в идентичных условиях спектр ФЛ структуры Si/Si:Er (образец № 37), для которой оцениваемое значение внутренней квантовой эффективности составляет  $\sim 20\%$  [2]. Как видно из рисунка, в сигнале ФЛ слоев Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er доминирует пик с максимумом на длине волны  $6507\text{ cm}^{-1}$  и шириной спектральной линии  $\sim 30\text{ cm}^{-1}$ . Судя по форме и ширине линии, этот пик может быть обусловлен оптически активными центрами иона эрбия в SiO<sub>2</sub>-подобных преципитатах, формирование которых также наблюдалось при определенных условиях роста в исследованных нами ранее слоях Si:Er [2]. Заметим, что для изученных в данной работе структур, несмотря на большие толщины слоя Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er и достаточно высокую концентрацию Ge в них, не наблюдалось заметного влияния релаксации упругих напряжений на люминесцентные свойства (рис. 2). Более того, сигнал ФЛ в частично отрелаксированных слоях Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er превышал по интенсивности сигнал в полностью напряженной структуре (величины остаточных упругих напряжений приведены в таблице).

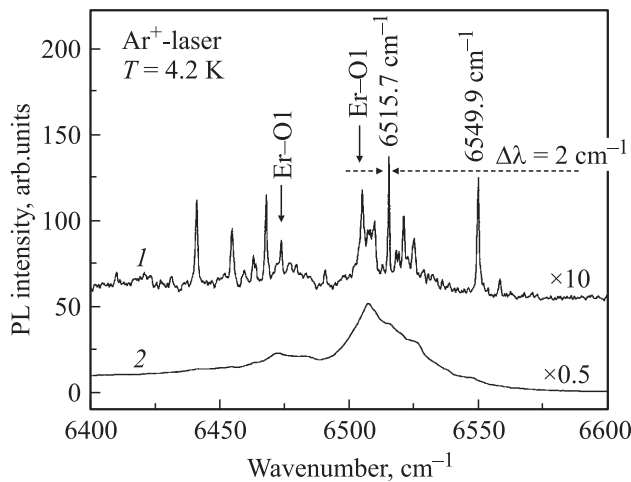
Оценим концентрацию оптически активных центров иона Er<sup>3+</sup> в исследуемых гетероструктурах. Это можно сделать с помощью анализа зависимости интенсивности эрбиевой ФЛ от мощности возбуждающего излучения. Как правило, в структурах Si:Er происходит насыщение интенсивности ФЛ при больших мощностях накачки. На рис. 3 представлены зависимости интенсивности ФЛ структур Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si от мощности возбуждающего излучения. Полученные зависимости  $I_{\text{PL}}(P)$  хорошо описываются известным выражением [6]

$$I_{\text{PL}} \propto a b P / (1 + b P), \quad (2)$$

где  $P$  — мощность возбуждающего излучения. Параметр  $a$  определяет уровень насыщения интенсивности ФЛ при больших мощностях накачки ( $I_{\text{PL}} \propto a$  при  $b P \gg 1$ ) и непосредственно зависит от концентрации оптически активных центров иона Er<sup>3+</sup>. Величина  $b$  характеризует рост интенсивности сигнала ФЛ в области слабого возбуждения ( $I_{\text{PL}} \propto a b P$  при  $b P \ll 1$ ). Сплошными линиями на рис. 3 показаны аппроксимирующие зависимости, рассчитанные по формуле (2) со следующими значениями коэффициентов:  $a = 32.2 \cdot 10^4$  arb. units,  $b = 0.036\text{ mW}^{-1}$  для зависимости 1;  $a = 21.2 \cdot 10^4$  arb. units,  $b = 0.006\text{ mW}^{-1}$  для зависимости 2;  $a = 20.9 \cdot 10^4$  arb. units,  $b = 0.004\text{ mW}^{-1}$  для зависимости 3;  $a = 1.22 \cdot 10^4$  arb. units,  $b = 0.011\text{ mW}^{-1}$  для зависимости 4. Полученные по результатам аппроксимации величины коэффициентов  $b$  на порядок меньше значений, определенных для слоев Si:Er [7]. Действительно, как видно из рис. 3, в исследованных структурах интенсивность сигнала ФЛ довольно слабо насыщается с увеличением мощности возбуждения. В приближении экситонного механизма возбуждения ионов Er<sup>3+</sup> наблюдаемый слабый рост  $I_{\text{PL}}(P)$  в структурах Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si, очевидно, можно объяснить



**Рис. 4.** Осциллограммы сигнала эрбиевой ФЛ, измеренные для структур № 10-90 (1) и 10-110 (2).



**Рис. 5.** Спектры ФЛ эпитаксиальных структур Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si. 1 — структура № 10-71, 2 — структура № 10-90. Стрелками показаны линии основных оптически активных центров иона Er, идентифицируемых в тонкой структуре спектра ФЛ образца № 10-71.

значительным вкладом в процессы возбуждения и де-возбуждения редкоземельных ионов Er альтернативных каналов рекомбинации. Последние могут проявляться как безызлучательные каналы рекомбинации, приводящие к уменьшению полного времени жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии, а также выступать в качестве конкурирующих каналов в процессе возбуждения редкоземельных ионов. При медленном росте сигнала ФЛ с увеличением мощности возбуждения и отсутствии насыщения, что наблюдается для исследованных структур Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si, величина коэффициента *b* в выражении (2) не зависит от концентрации оптически активных центров иона эрбия ( $N_0^E$ ) и определяется концентрацией альтернативных каналов. Отсюда, используя модель, описанную в [7], можно определить значение концентрации альтернативных каналов рекомбинации ( $N_0^A$ ), участвующих в процессе возбуждения ионов Er<sup>3+</sup> в

структурах Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si. Для наиболее эффективной с точки зрения интенсивности ФЛ структуры (образец № 10-110) эта величина составляет  $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Исходя из изложенного при условии  $N_0^A \gg N_0^E$  значение концентрации оптически активных ионов Er<sup>3+</sup> в исследуемых структурах может быть оценено величиной  $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , что составляет  $\sim 10\%$  от полной концентрации примеси эрбия.

Процессы безызлучательной рекомбинации в структурах Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si проявляются в виде особенностей на временных зависимостях ФЛ (рис. 4). Сплошными линиями на рисунке показаны аппроксимирующие функции, описываемые выражением  $I_{PL} = I_{PL}(0) + A_1 \exp(- (t - t_0)/\tau_1) + A_2 \exp(- (t - t_0)/\tau_2)$ . Для каждой из исследованных структур в осциллограммах сигнала эрбиевой ФЛ присутствует быстрая компонента с постоянной времени  $\tau_1 = 0.06 \text{ ms}$ , вклад которой зависит от кристаллического совершенства структур и, очевидно, связан с участием в процессах девозбуждения ионов Er безызлучательных каналов. Постоянные времена  $\tau_2$  для структур Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er/Si близки по величине к характерным значениям излучательного времени жизни иона Er<sup>3+</sup> в возужденном состоянии, составляющим для большинства полупроводников  $\sim 1 \text{ ms}$  [8]. Полное время жизни иона эрбия в возбужденном состоянии определяется величиной вклада экспоненциальных компонент (коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$ ) в кинетику спада ФЛ. Для отрелаксированной структуры (образец № 10-110) полное время жизни иона эрбия определяется постоянной времени  $\tau_1$  и составляет 0.06 ms. В кинетике ФЛ структуры с напряженным слоем Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:Er (образец № 10-90) доминирует медленная компонента  $\tau_2$ , полное время жизни иона эрбия в этом случае составляет  $\sim 0.7 \text{ ms}$ .

Оценим коэффициент оптического усиления в исследованных структурах так же, как это было проделано авторами работы [9] для слоев Si:Er. Коэффициент усиления *g* может быть рассчитан по формуле

$$g = N_0^E \frac{\lambda^4}{4\pi n^2 c \tau_r \Delta\lambda}, \quad (3)$$

где  $\lambda = 1.54 \mu\text{m}$ ,  $\tau_r$  — излучательное время жизни иона эрбия в возбужденном состоянии, *n* — показатель преломления среды, *c* — скорость света в вакууме,  $\Delta\lambda$  — ширина линии излучения на полувысоте,  $N_0^E$  — концентрация оптически активных ионов Er<sup>3+</sup>. Используя полученные значения для концентрации оптически активных ионов Er<sup>3+</sup> ( $N_0^E \sim 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), времени жизни ( $\tau_r \sim 1 \text{ ms}$ ) и ширины спектральной линии  $\sim 30 \text{ cm}^{-1}$  ( $\Delta\lambda \sim 7.5 \text{ nm}$ ), находим, что для образца с максимальной интенсивностью сигнала ФЛ (образец № 10-110) коэффициент усиления равен  $0.03 \text{ cm}^{-1}$ .

Как видно из выражения (3), увеличение коэффициента усиления в разрабатываемых лазерных структурах может быть достигнуто за счет уменьшения ширины линии ФЛ. Известно, что в слоях Si:Er, выращенных

по методике СМЛЭ, формирование эрбиевых центров с узкими линиями люминесценции происходит при высоких температурах роста ( $\sim 560\text{--}580^\circ\text{C}$ ) либо в результате послеростового отжига слоев [2]. Для слоев  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$  эти процессы могут носить другой характер, возможно также рассмотрение дополнительного солегирования (например, ионами кислорода). На рис. 5 представлен спектр ФЛ структуры  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ , выращенной из металлического источника эрбия (образец № 10-71). Структура подвергалась дополнительной имплантации ионами кислорода с энергией  $150\text{ keV}$  и дозой  $5 \cdot 10^{15}\text{ cm}^{-2}$  и отжигалась в вакууме при температуре  $800^\circ\text{C}$  в течение  $30\text{ min}$ . Проведенные исследования ФЛ описанной выше структуры позволили выявить оптически активные центры иона  $\text{Er}^{3+}$  с характерной тонкой структурой спектра, среди которых можно идентифицировать известный кислородсодержащий центр  $\text{Er-OI}$  [10]. Наиболее интенсивные линии люминесценции эрбиевых центров в этом образце соответствуют положению  $6515.7$  и  $6549.9\text{ cm}^{-1}$ . Ширина доминирующих в спектре линий ФЛ  $\Delta\lambda \sim 2\text{ cm}^{-1}$ . В этом случае существенное сужение линии приводит к увеличению на порядок коэффициента усиления  $g$ , оцениваемого величиной  $\sim 0.2\text{ cm}^{-1}$ .

#### 4. Заключение

Таким образом, в данной работе показано, что, используя методику СМЛЭ в атмосфере германа, можно создавать достаточно эффективные светоизлучающие эпитаксиальные структуры  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$ . Интенсивность ФЛ таких структур сравнима с интенсивностью ФЛ однородно легированных слоев  $\text{Si}:\text{Er}$ , для которых значение внутренней квантовой эффективности достигает  $\sim 20\%$ . Согласно проведенным оценкам, концентрация оптически активных центров иона  $\text{Er}^{3+}$  в исследованных слоях  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}$  составляет  $\sim 10\%$  от полной концентрации эрбиевой примеси. Коэффициент оптического усиления в полученных структурах составляет  $0.03\text{--}0.2\text{ cm}^{-1}$ , максимальное значение  $g$  достигается в образцах  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x:\text{Er}/\text{Si}$  с тонкой структурой спектра ФЛ.

#### Список литературы

- [1] Silicon-Based Optoelectronics / Ed. S. Coffa, L. Tsybeskov. MRS Bull. **23**, 4, 16 (1998).
- [2] Z.F. Krasilnik, V.Ya. Aleshkin, B.A. Andreev, O.B. Gusev, W. Jantsch, L.V. Krasilnikova, D.I. Kryzhkov, V.P. Kuznetsov, V.G. Shengurov, V.B. Shmagin, N.A. Sobolev, M.V. Stepikhova, A.N. Yablonsky. Towards the First Silicon Laser / Ed. L. Pavesi, S. Gaponenko, L. Dal Negro. NATO Sci. Ser. II. Mathematics, Physics and Chemistry. Kluwer Academic Publ., Dordrecht (2003). Vol. 93. P. 445.
- [3] B. Andreev, V. Chalkov, O. Gusev, A. Emel'yanov, Z. Krasil'nik, V. Kuznetsov, P. Pak, V. Shabanov, V. Shengurov, V. Shmagin, N. Sobolev, M. Stepikhova, S. Svetlov. Nanotechnology **13**, 97 (2002).
- [4] N.Q. Vinh, H. Przybylinska, Z.F. Krasil'nik, T. Gregorkiewicz. Phys. Rev. Lett. **90**, 6, 0664011 (2003).
- [5] С.П. Светлов, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, З.Ф. Красильник, Б.А. Андреев, Ю.Н. Дроздов. Изв. РАН. Сер. физ. **65**, 2, 203 (2001).
- [6] R. Serna, Jung H. Shin, M. Lohmeier, E. Vlieg, A. Polman, P.F.A. Alkemade. J. Appl. Phys. **79**, 5, 2658 (1996).
- [7] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, А.О. Солдаткин, М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, И.Н. Яссиевич. ФТТ **43**, 6, 979 (2001).
- [8] P.B. Klein, G.S. Pomrenke. Electron. Lett. **24**, 24, 1502 (1988).
- [9] В.Я. Алешкин, Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник. В сб. тр. совещ. „Нанофотоника-2002“. Н. Новгород (2002). С. 289.
- [10] H. Przybylinska, W. Jantsch, Yu. Suprun-Belevitch, M. Stepikhova, L. Palmetshofer, G. Hendorfer, A.Kozanecki, R.J. Wilson, B.J. Sealy. Phys. Rev. B **54**, 4, 2532 (1996).