

## Усиление интенсивности спонтанного излучения эрбия вблизи края фотонной зоны распределенных брэгговских отражателей на основе $a\text{-Si:H}/a\text{-SiO}_x\text{:H}$

© А.В. Медведев<sup>¶</sup>, Н.А. Феоктистов, А.Б. Певцов, В.Г. Голубев

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

(Получена 24 марта 2005 г. Принята к печати 8 апреля 2005 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований спонтанной эмиссии ионов эрбия в спектральной области края нижней фотонной зоны распределенных брэгговских отражателей (одномерных фотонных кристаллов). Фотонные кристаллы состояли из чередующихся четвертьволновых слоев  $a\text{-Si:H}$  и  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ , выращенных методом плазмохимического газофазного осаждения (plasma enhancement chemical vapor deposition). Эрбий вводился в слои  $a\text{-Si:H}$  магнетронным распылением эрбиевой мишени в процессе роста структуры. Наблюдаемое изменение интенсивности спонтанного излучения обусловлено немонотонным поведением плотности оптических мод вблизи края фотонной зоны.

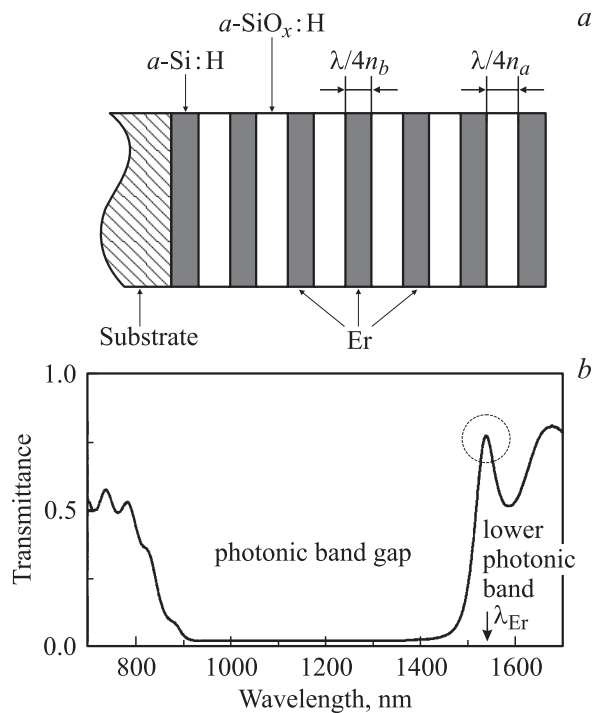
Характеристики спонтанной эмиссии зависят как от собственных свойств излучающих центра, так и от свойств окружающей его среды. В режиме слабого взаимодействия атома с электромагнитным полем вероятность спонтанного излучательного перехода ( $W_r$ ), согласно золотому правилу Ферми, пропорциональна плотности фотонных состояний  $\rho(\omega)$  в окрестности перехода [1]. Таким образом, модификация плотности мод по сравнению с их распределением в свободном пространстве дает возможность изменять  $W_r$  и, соответственно, интенсивность спонтанного излучения [2]. Для реализации идеи, высказанной в [2], наиболее подходящими объектами являются фотонные кристаллы (ФК) — структуры с периодической пространственной модуляцией диэлектрической проницаемости с периодом, сравнимым с длиной волны света. Эта периодичность, по аналогии с электронной зонной структурой атомных кристаллов, обуславливает возникновение фотонной зонной структуры. Наличие фотонных зон (ФЗ) позволяет управлять взаимодействием излучающего центра, помещенного внутрь ФК, с электромагнитным полем и тем самым подавлять или усиливать интенсивность излучения [3,4]. Возможность сильной модификации эмиссии в ФК открывает перспективу применений этих материалов, например, в современных системах передачи информации [5] и высокоэффективных термофотовольтаических преобразователях [6]. Наиболее интересными объектами для исследования влияния свойств ФК на характеристики спонтанной эмиссии являются трехмерные структуры [7–9]. Именно в таких ФК возможна реализация полной фотонной запрещенной зоны (photonic band gap) и запрет распространения излучения во всех направлениях в соответствующем спектральном диапазоне. Вместе с тем следует отметить, что и на примере одномерных ФК возможно экспериментальное и теоретическое исследование специфики взаимодействия излучательных центров с периодической

структурой ФК [10]. При этом по сравнению с трехмерными структурами технология изготовления одномерных систем существенно проще и лучше контролируема.

Изменение интенсивности излучения в одномерных ФК — распределенных брэгговских отражателях — РБО (distributed Bragg reflectors — DBR) вблизи края ФЗ наблюдалось ранее в периодических структурах AlAs/AlGaAs с излучающим слоем GaAs [11], в жидкокристаллических брэгговских структурах [12], брэгговских структурах на основе аморфных нитридов и оксида кремния [13–15]. В настоящей работе мы представляем экспериментальные результаты по исследованию модификации спонтанного излучения ионов эрбия, обусловленной немонотонным поведением плотности фотонных мод в районе края нижней ФЗ одномерных ФК, представляющих собой РБО из чередующихся слоев  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiO}_x\text{:H}$ . Выбор объектов исследования обусловлен следующими обстоятельствами, важными для технических приложений: во-первых, технология получения пленок  $a\text{-Si:H}$  и  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  относительно проста, совместима со стандартной кремниевой технологией и широко используется в промышленности для производства тонкопленочных транзисторов и солнечных батарей; во-вторых, излучательный переход иона эрбия из первого возбужденного в основное состояние расположен в спектральной области 1.5 мкм, совпадающей с окном прозрачности в оптоволоконных линиях связи [16].

Образцы одномерных фотонных кристаллов (рис. 1, а) выращивались методом высокочастотного (RF) разложения аргоно-силановой смеси в плазме тлеющего разряда (glow discharge) по технологии, аналогичной [17–19]. В качестве источников спонтанной эмиссии мы выбрали ионы эрбия, которые в отличие от [17–19] вводились в слои  $a\text{-Si:H}$  в процессе роста брэгговской структуры магнетронным распылением эрбиевой мишени. Мишень размещалась в технологическом реакторе вне зоны высокочастотного газового разряда и не влияла на распределение электрического поля в разрядном промежутке. Развитая технология позволяла легировать эрбием

<sup>¶</sup> E-mail: Medvedev@gvg.ioffe.ru



**Рис. 1.** *a* — схема 13-слойной брэгговской структуры, состоящей из чередующихся слоев  $a\text{-Si:H}$  и  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ . Три центральных слоя  $a\text{-Si:H}$  структуры легированы эрбием. *b* — спектр пропускания структуры, приведенный на рис. 1, *a*. Стрелкой показана длина волны  $\lambda_{\text{Er}} = 1535$  нм, соответствующая излучательному переходу ионов эрбия из первого возбужденного состояния в основное. Штриховым кружком отмечен краевой интерференционный максимум.

любой слой  $a\text{-Si:H}$  в процессе роста. В выращенных образцах были легированы центральные слои  $a\text{-Si:H}$  (см. рис. 1, *a*), что позволило увеличить количество излучающих центров внутри ФК и тем самым повысить интенсивность сигнала фотолуминесценции.

Параметры РБО подбирались таким образом, чтобы край нижней ФЗ находился в спектральной области излучательного оптического перехода иона эрбия из первого возбужденного состояния в основное ( $\lambda_{\text{Er}} = 1535$  нм). Для этой цели проводился предварительный расчет оптических толщин отдельных слоев структуры, в котором использовались данные эллипсометрических измерений показателей преломления контрольных (reference) пленок  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  ( $n_a = 1.46$ ) и  $a\text{-Si:H}$  ( $n_b = 3.44$ ).

В процессе роста брэгговской структуры контроль оптических толщин слоев осуществлялся *in situ* по интерференционной картине, возникающей при регистрации отраженного сигнала от поверхности растущей пленки. Следует отметить, что при последовательном осаждении слоев РБО коэффициент отражения в спектральной области фотонной запрещенной зоны по мере ее формирования быстро приближается к 100% и в дальнейшем меняется незначительно при наращивании

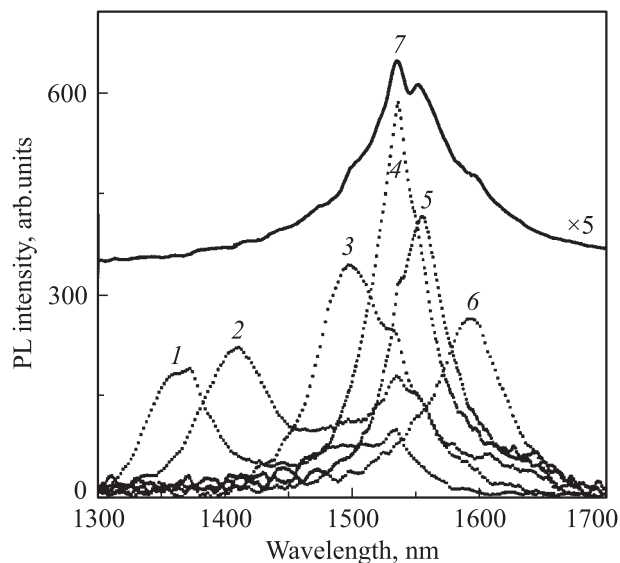
последующих слоев. Поэтому для повышения точности измерения оптических толщин регистрация сигнала проводилась в спектральном диапазоне сильного изменения коэффициента отражения, вне фотонной запрещенной зоны.

Процесс роста структуры начинался со слоя  $a\text{-Si:H}$ . В начальный момент времени коэффициент отражения определялся только подложкой (стекло) и был минимален. По мере увеличения толщины  $d$  пленки  $a\text{-Si:H}$  интенсивность отраженного света возрастала, достигала максимума при  $d = \lambda/4n_b$ , а затем уменьшалась. При прохождении сигнала отражения через минимум выполнялось переключение потоков газов, и начинался рост пленки  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  с показателем преломления  $n_a$ . Затем цикл осаждения повторялся. Выращенные образцы РБО состояли из 13 чередующихся четвертьволновых слоев  $a\text{-Si:H}$  и  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ . Оптические толщины структур варьировались в процессе их роста заданным образом, что позволяло сдвигать положение края ФЗ РБО относительно  $\lambda_{\text{Er}}$  как в коротковолновую, так и в длинноволновую сторону. Общая толщина структуры без учета подложки составляла 1.7 мкм.

Фотолуминесценция ионов эрбия возбуждалась излучением криптонового лазера с длиной волны 647.1 нм. Регистрация спектров пропускания и фотолуминесценции осуществлялась в направлении, совпадающем с нормалью к поверхности брэгговской структуры, с помощью автоматизированного решеточного монохроматора в режиме синхронного детектирования. Приемником излучения служил InGaAs-фотодиод. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Экспериментальный спектр пропускания одной из полученных структур показан на рис. 1, *b*. Видна широкая область малого пропускания (850–1550 нм), соответствующая одномерной фотонной запрещенной зоне, в пределах которой плотность фотонных мод близка к нулю и распространение электромагнитных волн в направлении, перпендикулярном поверхности брэгговской структуры, подавлено. Вне этой области (зоны разрешенных состояний) фотоны распространяются свободно, и в спектре наблюдается сложная интерференционная картина, обусловленная конечной толщиной брэгговской структуры.

В идеальном случае неограниченного одномерного ФК при отсутствии диссипации в зависимости плотности фотонных мод от частоты должна появляться сингулярность на краю ФЗ ( $\rho(\omega) \propto dk/d\omega \rightarrow \infty$ ,  $k$  — волновой вектор) [20]. В реальных структурах конечного размера в спектральном диапазоне нижней ФЗ по мере возрастания частоты плотность фотонных мод увеличивается и вблизи края ФЗ достигает максимума, величина которого превышает соответствующее значение  $\rho(\omega)$  в свободном пространстве [7,11,21]. Далее в области запрещенной фотонной зоны  $\rho(\omega)$  резко падает. Согласно выводу электромагнитной вариационной теоремы [22], плотность энергии электромагнитного поля в ФК на частотах, соответствующих нижней ФЗ,



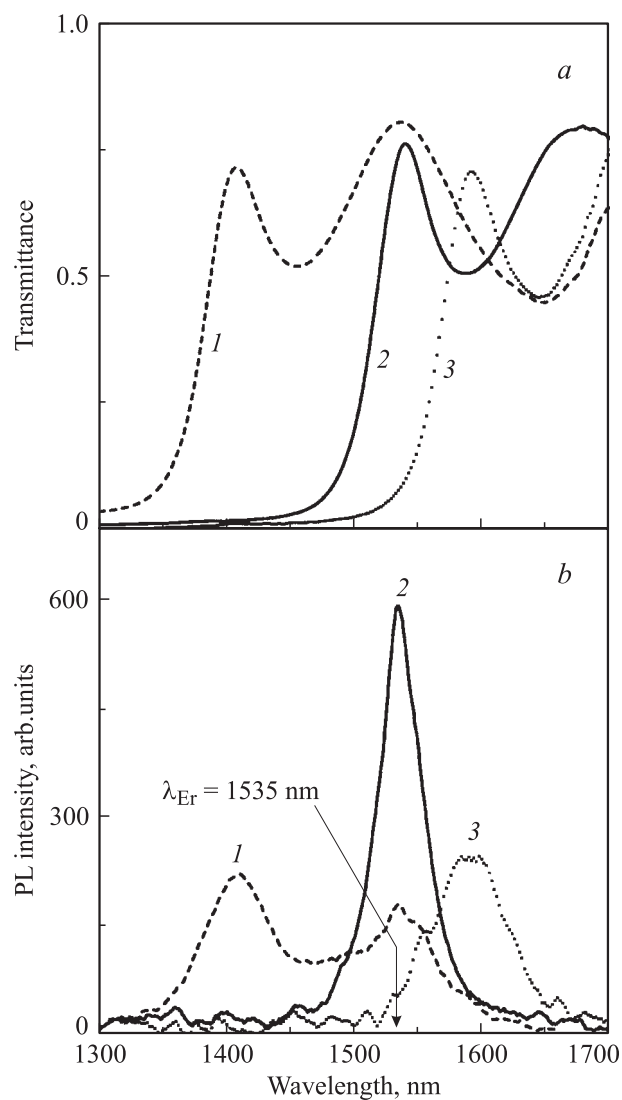
**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции 13-слойных брэгговских структур, состоящих из чередующихся слоев  $a\text{-Si:H}$  и  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  с легированными эрбием тремя центральными слоями  $a\text{-Si:H}$ . Графики различаются положениями краевого интерференционного максимума в спектре пропускания, нм (см. рис. 1, *b*): 1 — 1365, 2 — 1410, 3 — 1495, 4 — 1535, 5 — 1555, 6 — 1595. Спектр излучения ионов эрбия в одиночной пленке  $a\text{-Si:H}$  (7) сдвинут, для наглядности, по оси ординат.

концентрируется в областях с высоким показателем преломления, т. е. в слоях  $a\text{-Si:H}$  для образцов, исследованных в настоящей работе. Из вышесказанного следует, что влияние периодической структуры ФК на взаимодействие излучающих эрбиевых центров с электромагнитным полем в наших структурах сильнее должно проявляться в спектральной области, соответствующей краю нижней ФЗ.

Все последующие измерения (рис. 2–4) проводились в спектральной области края нижней ФЗ. Как уже говорилось, исследованные образцы несколько отличались толщинами слоев, что приводило к смещению спектрального положения „краевого“ интерференционного максимума (отмечен кружком на рис. 1, *b*). На рис. 2 приведены спектры люминесценции шести (кривые 1–6) РБО с различными положениями краевого интерференционного максимума, измеренные при одинаковых условиях возбуждения и регистрации сигнала фотолюминесценции. Кривая 7 соответствует неоднородно уширенной полосе излучения ионов эрбия в одиночной пленке  $a\text{-Si:H}$ . Из рисунка видно, что распределение основных (наиболее интенсивных) максимумов в спектрах излучения брэгговских структур воспроизводит контур фотолюминесценции ионов эрбия в одиночной пленке  $a\text{-Si:H}$ .

Перейдем теперь к рассмотрению влияния немонотонного поведения плотности фотонных мод вблизи края ФЗ на интенсивность излучения ионов эрбия. На

рис. 3 приведены спектры пропускания (рис. 3, *a*) и люминесценции (рис. 3, *b*) трех брэгговских структур со специально подобранными спектральными положениями краевого интерференционного максимума в спектре пропускания относительно положения пика  $\lambda_{\text{Er}}$  в одиночной пленке  $a\text{-Si:H}$ : 1) структура #1 — край интерференционного максимума пропускания сдвинут к коротким длинам волн относительно  $\lambda_{\text{Er}}$ ; энергия излучательного перехода попадает в область фотонных состояний нижней ФЗ, где плотность мод заметно меньше по



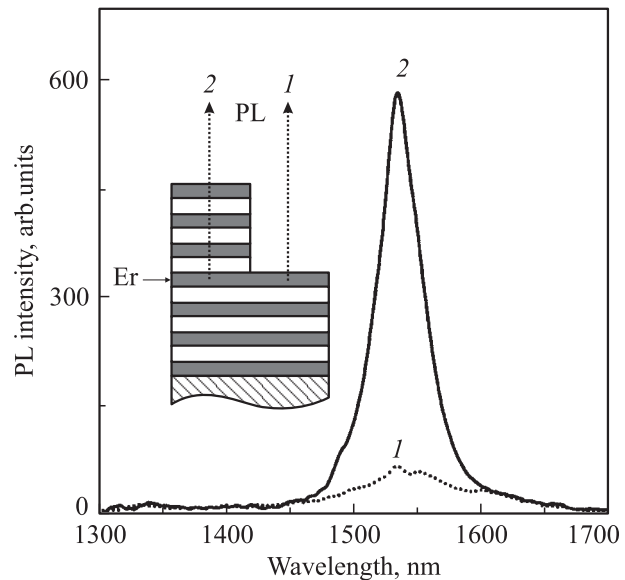
**Рис. 3.** Сопоставление спектров пропускания (*a*) и фотолюминесценции (*b*) трех брэгговских структур с различным спектральным положением краевого интерференционного максимума относительно длины волны ( $\lambda_{\text{Er}} = 1535$  нм), соответствующей излучательному переходу ионов эрбия из первого возбужденного состояния в основное. Энергия излучательного перехода попадает в область разрешенных состояний нижней фотонной зоны вдали от ее края (1); энергия излучательного перехода расположена в области края нижней фотонной зоны (2); энергия излучательного перехода попадает в область запрещенной фотонной зоны (3).

сравнению с ее значением на краю [21] (в этом случае  $\lambda_{Er}$  находится в районе второго интерференционного пика, характеризуемого большим значением коэффициента пропускания по сравнению с краевым интерференционным максимумом); 2) структура #2 — краевой интерференционный максимум пропускания совпадает с  $\lambda_{Er}$ ; энергия излучательного перехода лежит в области края ФЗ, где плотность фотонных мод максимальна; 3) структура #3 — краевой интерференционный максимум пропускания сдвинут в длинноволновую сторону относительно  $\lambda_{Er}$ ; энергия излучательного перехода попадает в область запрещенной зоны, характеризующуюся низкой плотностью фотонных состояний.

Из сопоставления спектров пропускания и фотолюминесценции, представленных на рис. 3, видно, что интенсивность излучения максимальна, когда  $\lambda_{Er}$  (кривая 2, рис. 3, b) лежит в районе краевого интерференционного максимума пропускания и заметно уменьшается при сдвиге этого максимума как в коротковолновую (кривая 1), так и в длинноволновую сторону (кривая 3) относительно  $\lambda_{Er}$ . Подчеркнем, что для брэгговской структуры #1 падение интенсивности фотолюминесценции на длине волны  $\lambda_{Er}$  (кривая 1, рис. 3, b) наблюдается, несмотря на то, что коэффициент пропускания (кривая 1, рис. 3, a) в этой области превышает его величину в районе краевого интерференционного максимума. Этот факт свидетельствует о том, что наблюдаемое увеличение (уменьшение) интенсивности фотолюминесценции не коррелирует с периодической модуляцией прозрачности брэгговской структуры [17,23], а является следствием немоногомного изменения плотности оптических мод в одномерном фотонном кристалле.

Для количественной оценки увеличения интенсивности спонтанной эмиссии ионов эрбия вблизи края ФЗ РБО был выращен реперный образец. После осаждения седьмого (центрального) слоя  $a\text{-Si:H}$ , легированного эрбием, часть поверхности структуры закрывалась (правая часть структуры, изображенной на рис. 4). Затем процесс роста продолжался до 13 слоев (левая часть структуры, изображенной на рис. 4). Спектры излучения ионов эрбия из поверхностного слоя  $a\text{-Si:H}$  семислойной структуры и из центрального слоя  $a\text{-Si:H}$ , находящегося внутри тринадцатислойной структуры, приведены на рис. 4. Из сравнения спектров можно сделать вывод о том, что интенсивность спонтанной эмиссии ионов эрбия, помещенных внутрь одномерного ФК, возрастает почти на порядок в спектральной области, соответствующей краю нижней ФЗ.

Таким образом, выращены одномерные фотонные кристаллы, представляющие собой брэгговские структуры из чередующихся слоев  $a\text{-Si:H}$  и  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ . В процессе роста структур в центральные слои  $a\text{-Si:H}$  были введены источники спонтанной эмиссии — ионы эрбия. Исследованы спектры пропускания и фотолюминесценция синтезированных структур. Экспериментально показано, что частотный сдвиг края фотонной зоны относительно спектрального положения излучательного перехода



**Рис. 4.** 1 — спектр излучения ионов эрбия из четвертьволновой пленки на поверхности семислойной брэгговской структуры, состоящей из чередующихся слоев  $a\text{-Si:H}$  и  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  (правая часть структуры, изображенной на рисунке). 2 — спектр излучения ионов эрбия из центрального четвертьволнового слоя 13-слойной брэгговской структуры, состоящей из чередующихся слоев  $a\text{-Si:H}$  и  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  (левая часть структуры, изображенной на рисунке). Спектр 2 измерен в условиях, когда энергия излучательного перехода ионов эрбия из первого возбужденного состояния в основное расположена в области края нижней фотонной зоны.

иона эрбия позволяет существенно модифицировать интенсивность спонтанной эмиссии ионов эрбия за счет сильного изменения плотности оптических мод в одномерном фотонном кристалле. Спектральный диапазон, в котором наблюдалось увеличение интенсивности излучения, соответствует стандарту современных телекоммуникационных технологий (1.5 мкм), что дает основание рассматривать возможность применения изготовленных брэгговских структур для создания, например, планарных оптических усилителей в системах передачи информации.

Авторы признательны А.В. Селькину и А.А. Дукину за полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-02-17803), гранта NATO PST.CLG 980399 и контракта PHOREMOST (FP6/2003/IST-2-511616).

## Список литературы

- [1] Р. Лоудон. *Квантовая теория света*. (М., Мир, 1976). [Пер. с англ.: R. Loudon. *The Quantum Theory of Light* (Clarendon, Oxford, 1973)].
- [2] E.M. Purcell. *Phys. Rev.*, **69**, 681 (1946).
- [3] E. Yablonovitch. *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 2059 (1987).
- [4] S. John. *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 2486 (1987).

- [5] A. Polman, P. Wiltzius. MRS Bulletin, **26**, 608 (2001).
- [6] S.Y. Lin, J.G. Fleming, I. El-Kady. Appl. Phys. Lett., **83**, 593 (2003).
- [7] M. Woldeyohannes, S. John. J. Optics B: Quant. Semiclass. Opt., **5**, R43 (2003).
- [8] P. Lodahl, A.F. van Driel, I.S. Nikolaev, A. Irman, K. Overgaag, D. Vanmaekelbergh, W. Vos. Nature, **430**, 654 (2003).
- [9] M.J.A. de Dood, A. Polman, J.G. Fleming. Phys. Rev. B, **67**, 115 106 (2003).
- [10] C. Weisbuch, H. Benisty, R. Houdre. J. Luminesc., **85**, 271 (2000).
- [11] M.D. Tocci, M. Scalora, M.J. Bloemer, J.P. Dowling, C. Bowden. Phys. Rev. A, **53**, 2799 (1996).
- [12] V.I. Kopp, B. Fan, H.K.M. Vithana, A.Z. Genack. Opt. Lett., **23**, 1707 (1998).
- [13] F. Girgis. Appl. Phys. Lett., **77**, 522 (2000).
- [14] A. Serpenguzel, S. Tannriseven. Appl. Phys. Lett., **78**, 1388 (2000).
- [15] E. Ozbay, I. Bulu, K. Aydin, H. Gaglayan, K. Guven. Photonics and Nanostructures — Fundamentals and Applications, **2**, 87 (2004).
- [16] A. Polman. J. Appl. Phys., **82**, 1 (1997).
- [17] A.A. Dukin, N.A. Feoktistov, V.G. Golubev, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov, A.V. Sel'kin. Appl. Phys. Lett., **77**, 3009 (2000).
- [18] В.Г. Голубев, А.А. Дукин, А.В. Медведев, А.Б. Певцов, А.В. Селькин, Н.А. Феоктистов. ФТП, **35**, 1266 (2001).
- [19] A.A. Dukin, N.A. Feoktistov, V.G. Golubev, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov, A.V. Sel'kin. Phys. Rev. E, **67**, 046 602 (2003).
- [20] А. Ярив, П.Юх. *Оптические волны в кристаллах* (М., Мир, 1987). [Пер. с англ.: A. Yariv, P. Yeh. *Optical waves in crystals* (N.Y., Wiley, 1984)].
- [21] J.M. Bendickson, J. Dowling, M. Scalora. Phys. Rev. E, **53**, 4107 (1996).
- [22] J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, J.N. Winn. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995).
- [23] В.Г. Голубев, А.В. Медведев, А.Б. Певцов, А.В. Селькин, Н.А. Феоктистов. ФТТ, **41**, 153 (1999).

Редактор Л.В. Беляков

## Enhancement of erbium spontaneous emission near the photonic band edge in distributed Bragg reflectors based on $a\text{-Si:H}/a\text{-SiO}_x\text{:H}$

A.V. Medvedev, N.A. Feoktistov, A.B. Pevtsov, V.G. Golubev

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** We present results of an experimental investigation on the erbium ion spontaneous emission within spectral range of the lower photonic band edge in distributed Bragg reflectors (one-dimensional photonic crystals). The photonic crystals composed of alternating quarter-wave  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiO}_x\text{:H}$  layers fabricated by plasma enhancement chemical vapor deposition technique. Erbium was introduced into  $a\text{-Si:H}$  layers by magnetron sputtering of an erbium target during growth of the structure. The observable modification of erbium spontaneous emission intensity was caused by non-monotonic behavior of the density of optical states near the photonic band edge.