

06;07

## Эффективное оптическое возбуждение и резонансная люминесценция ионов эрбия в спектральной области собственных мод планарного микрорезонатора

© А.В. Медведев, А.А. Дукин, А.Б. Певцов,  
С. Sabilia, Н.А. Феоктистов, В.Г. Голубев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: Medvedev@gvg.ioffe.ru  
INFN at Dipartimento di Energetica,  
Università di Roma 'La Sapienza', Via Scarpa 16 00161 Roma, Italy

Поступило в Редакцию 24 апреля 2007 г.

Продемонстрировано сильное увеличение интенсивности спонтанной эмиссии ионов эрбия, помещенных в активный слой  $a\text{-SiO}_x$  планарного микрорезонатора на основе слоев  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiO}_x$ . Показано, что использование собственных мод микрорезонатора как для ввода возбуждающего излучения, так и для вывода фотолюминесценции увеличивает интенсивность спонтанной эмиссии ионов эрбия примерно в 500 раз по сравнению с одиночной пленкой  $a\text{-SiO}_x(\text{Er})$ .

PACS: 42.55.Sa, 42.70.Qs, 78.67.Pt, 78.55.Hx

Оптические микрорезонаторы (МР) привлекают к себе большое внимание, с одной стороны, как модельные объекты для исследования фундаментальных свойств квантовой электродинамики, с другой стороны, — в плане создания на их базе перспективных оптоэлектронных устройств [1]. Планарный МР представляет собой твердотельную структуру, состоящую из двух распределенных брэгговских отражателей (РБО) и активного слоя, помещенного между ними. За счет квантования электромагнитного поля в МР возникает дискретный набор собственных мод, количество которых определяется линейным размером активного слоя.

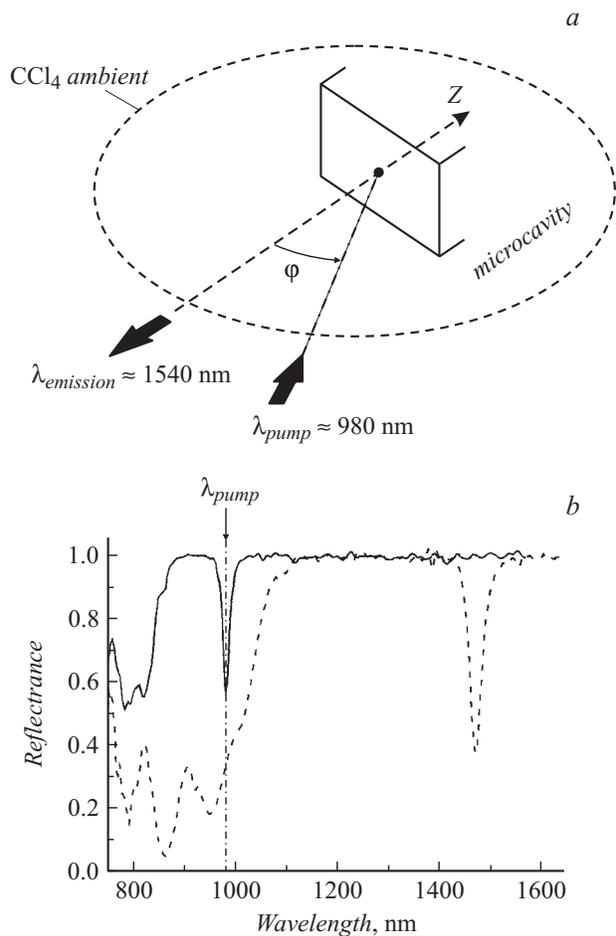
Известны два основных способа увеличения интенсивности спонтанной эмиссии излучающих центров с помощью МР структур: в первом

увеличение интенсивности осуществляется за счет взаимодействия излучательных центров с электромагнитным полем при резонансе энергии излучательного перехода с оптической модой МР [2]; во втором используется возбуждение излучательных центров через собственную моду МР, что приводит к увеличению поглощения энергии оптической накачки люминофором, расположенным в активном слое МР [3].

В настоящей работе для увеличения интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) люминоформа мы объединили вышеизложенные подходы и использовали собственные моды МР как для ввода возбуждающего излучения ( $\lambda_{\text{pump}}$ ), так и для вывода эмиссии излучательных центров ( $\lambda_{\text{emission}}$ ).

В качестве модельного объекта был выбран МР, состоящий из двух РБО на основе чередующихся четвертьволновых слоев  $a\text{-Si:H/a-SiO}_x$  и расположенного между ними полуволнового активного слоя  $a\text{-SiO}_x$ , легированного ионами  $\text{Er}^{3+}$ . Наш выбор обусловлен следующими соображениями: 1) МР на основе слоев  $a\text{-Si:H/a-SiO}_x$  обладает высоким диэлектрическим контрастом (отношение диэлектрических проницаемостей слоев РБО), что позволяет упростить конструкцию структуры и изготавливать высокодобротные МР при малом количестве слоев в РБО [4,5]; 2) свойства внутрицентровых оптических переходов ионов эрбия в матрице  $a\text{-SiO}_x$  детально изучены [6]; 3) устройства на основе кварцевых волокон, легированных эрбием, широко используются в телекоммуникационной технике в качестве усилителей на длину волны 1540 nm [7]. В нашем эксперименте основной переход ( ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ ) иона  $\text{Er}^{3+}$  предполагается использовать в качестве излучательного ( $\lambda_{\text{emission}} \approx 1540 \text{ nm}$ ), а ближайший к нему ( ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ ) — для его возбуждения ( $\lambda_{\text{pump}} \approx 980 \text{ nm}$ ). Схема эксперимента представлена на рис. 1, а.

Параметры МР были рассчитаны методом матриц переноса [8]. Толщины слоев подбирались таким образом, чтобы собственная мода МР при нормальном падении света была настроена на длину волны  $\lambda_{\text{emission}} \approx 1540 \text{ nm}$ . Вместе с тем проведенные расчеты показали, что значения диэлектрических проницаемостей слоев  $a\text{-Si:H/a-SiO}_x$  [4] не позволяют создать МР структуру, собственные моды которой можно было бы настроить на  $\lambda_{\text{emission}} \approx 1540 \text{ nm}$  и  $\lambda_{\text{pump}} \approx 980 \text{ nm}$  при экспериментально достижимых углах падения ( $0 < \varphi < 90^\circ$ ), если внешней средой является воздух. Чтобы удовлетворить этому условию, необходимо использовать внешнюю среду с показателем преломления больше 1.25.



**Рис. 1.** *a* — схема эксперимента по исследованию люминесценции ионов эрбия в планарном микрорезонаторе в зависимости от угла падения излучения накачки; микрорезонатор погружен в иммерсионную жидкость  $\text{CCl}_4$ ,  $\lambda_{\text{pump}} \approx 980 \text{ nm}$  — длина волны возбуждающего излучения,  $\lambda_{\text{emission}} \approx 1540 \text{ nm}$  — длина волны регистрации фотолюминесценции,  $\varphi$  — угол падения света. *b* — спектры отражения света в ТЕ-поляризации от микрорезонатора на основе слоев  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiO}_x$  при двух углах падения:  $\varphi = 20^\circ$  — штриховая линия,  $\varphi = 54^\circ$  — сплошная линия. Стрелка отмечает длину волны возбуждения ( $\lambda_{\text{pump}} \approx 980 \text{ nm}$ ).

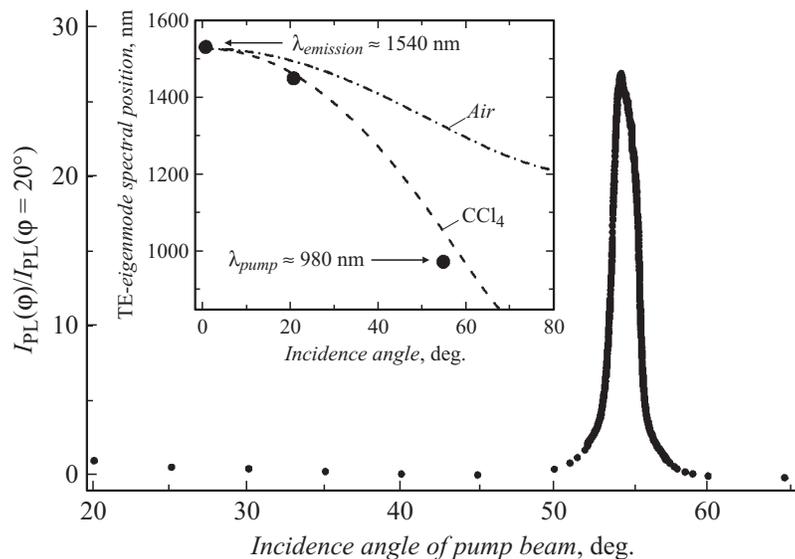
Оптимизированный под нашу задачу МР был выращен методом плазмохимического газофазного осаждения (детали технологического процесса описаны в [4,5]) и представлял собой полуволновой слой  $a\text{-SiO}_x(\text{Er})$  между двумя РБО, каждый из которых, в свою очередь, состоял из двух пар чередующихся четвертьволновых слоев  $a\text{-Si:H}$  и  $a\text{-SiO}_x$ . Выращенные структуры подвергались температурному отжигу при  $1000^\circ\text{C}$  в воздушной атмосфере, что позволило существенно снизить в активном слое концентрацию гидроксильных групп, которые являются эффективными тушителями ФЛ эрбия [9].

ФЛ ионов эрбия возбуждалась поляризованным в ТЕ компоненте излучением полупроводникового лазера с длиной волны  $980\text{ nm}$ . Выбор ТЕ-поляризации обусловлен большей концентрацией поля ТЕ моды в активном слое по сравнению с ТМ модой [10]. Чтобы подстроить спектральное положение собственной моды МР к  $\lambda_{\text{pump}} \approx 980\text{ nm}$  в экспериментально достижимом диапазоне углов, структура была помещена в иммерсионную жидкость  $\text{CCl}_4$  с показателем преломления  $n = 1.42$  (рис. 1, *a*).

На рис. 1, *b* представлены экспериментальные спектры отражения исследуемого МР при двух углах падения света. При  $\varphi = 20^\circ$  край полосы почти 100% отражения (край стоп-зоны) находится в районе  $1100\text{ nm}$ . При  $\varphi = 54^\circ$  край стоп-зоны сдвигается в область меньших длин волн и расположен в районе  $870\text{ nm}$ . В коротковолновой, относительно края стоп-зоны, диапазоне длин волн находится область с малым коэффициентом отражения, соответствующая разрешенной (фотонной) зоне РБО. С длинноволновой стороны измерения спектров ограничены чувствительностью InGaAs фотодиода. Острый провал на спектре обусловлен собственной модой МР.

Спектральное положение собственной моды монотонно сдвигается в коротковолновую область по мере увеличения угла падения света. Точки на вставке к рис. 2 соответствуют экспериментальным данным, пунктирная линия — расчету методом матриц переноса. Для сравнения на вставке приведен также расчет угловой зависимости (штрихпунктирная линия) положения собственной моды для МР в воздушном окружении.

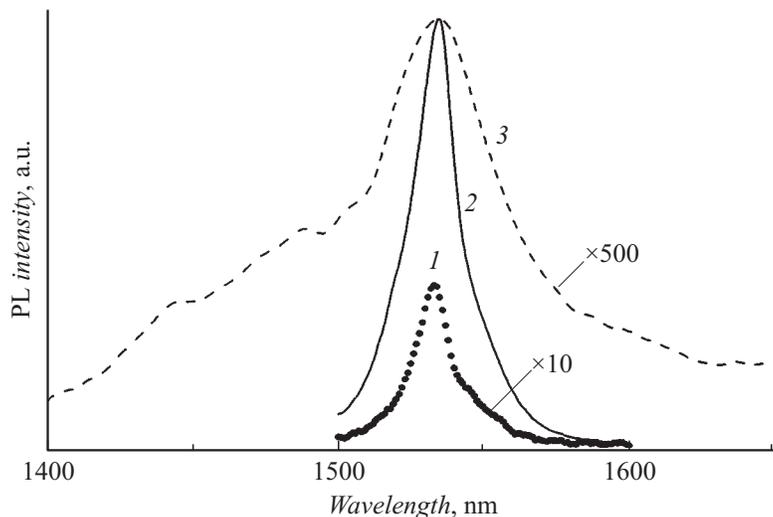
При угле падения  $\varphi \leq 20^\circ$  длина волны возбуждающего излучения ( $980\text{ nm}$ ) находится в области с малым коэффициентом отражения — фотонной зоне (рис. 1, *b*, штриховая линия). При угле падения  $\varphi = 54^\circ$  длина волны накачки совпадает с ТЕ собственной модой МР (рис. 1, *b*,



**Рис. 2.** Зависимость отношения  $I_{PL}(\varphi)/I_{PL}(\varphi = 20^\circ)$  от угла падения ТЕ-поляризованного излучения накачки ( $\lambda_{\text{pump}} \approx 980 \text{ nm}$ ).  $I_{PL}(\varphi)$  — интенсивность фотолюминесценции ионов эрбия ( $\lambda_{\text{emission}} \approx 1540 \text{ nm}$ ) из микрорезонатора на основе слоев  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiO}_x$ .  $\varphi$  — угол падения возбуждающего излучения. На вставке изображена угловая зависимость спектрального положения собственной ТЕ-моды микрорезонатора: внешняя среда — воздух (штрихпунктирная линия), внешняя среда —  $\text{CCl}_4$  (штриховая линия). Точки — данные эксперимента.

сплошная линия). Таким образом, при этих двух углах ввода излучения становится возможным сравнить эффективность накачки через собственную моду МР и через фотонную зону.

Рис. 2 демонстрирует зависимость интенсивности ФЛ эрбия при фиксированной длине волны ( $\lambda_{\text{emission}} = 1540 \text{ nm}$ ) от угла падения излучения накачки ( $\lambda_{\text{pump}} \approx 980 \text{ nm}$ ) на поверхность МР. В диапазонах углов  $20^\circ < \varphi < 50^\circ$  и  $60^\circ < \varphi < 65^\circ$  угол падения луча возбуждающего лазера менялся дискретно с шагом  $5^\circ$ , в диапазоне  $50^\circ < \varphi < 60^\circ$  осуществлялось непрерывное сканирование по углу. Резкий максимум интенсивности ФЛ наблюдался при  $\varphi = 54^\circ$ , когда длина волны излучения накачки совпадала со спектральным положением собственной моды



**Рис. 3.** Спектры фотолюминесценции ионов эрбия из микрорезонатора на основе  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiO}_x$  с активным слоем  $a\text{-SiO}_x(\text{Er})$ , измеренные при разных углах падения возбуждающего излучения:  $\varphi = 20^\circ$  (1),  $\varphi = 54^\circ$  (2). Для сравнения приведен спектр (3) фотолюминесценции ионов эрбия из одиночной пленки  $a\text{-SiO}_x(\text{Er})$  с толщиной, равной толщине активного слоя микрорезонатора.

МР. Ширина этого максимума на полувысоте составляет около  $1.5^\circ$  и определяется добротностью МР.

На рис. 3 приведены спектры ФЛ при разных углах падения луча лазера накачки: 1) возбуждение осуществляется через фотонную зону ( $\varphi = 20^\circ$ ), 2) возбуждение осуществляется через моду МР ( $\varphi = 54^\circ$ ), 3) спектр ФЛ одиночной пленки  $a\text{-SiO}_x(\text{Er})$  с толщиной, равной толщине активного слоя МР ( $\varphi = 54^\circ$ ). Видно, что наблюдаемая интенсивность ФЛ эрбия при возбуждении через собственную моду МР примерно в 25 раз превосходит интенсивность ФЛ при возбуждении через фотонную зону. Сигнал ФЛ из одиночной пленки  $a\text{-SiO}_x(\text{Er})$  еще примерно в 20 раз слабее, чем из МР при оптической накачке через фотонную зону. Таким образом, использование собственных мод МР как для ввода возбуждающего излучения, так и для вывода ФЛ позволяет увеличить интенсивность спонтанной эмиссии ионов эрбия,

помещенных в активный слой МР, примерно в 500 раз по сравнению с одиночной пленкой  $a\text{-SiO}_x(\text{Er})$ .

Для оценки возможного увеличения интенсивности ФЛ излучательных центров, помещенных в активный слой МР, мы рассчитали методом матриц переноса пространственные распределения электрических полей в исследуемой МР структуре. Интенсивность ФЛ возрастает пропорционально интегралу перекрытия полей возбуждения и излучения в активном слое. Численный расчет показывает, что величина интеграла перекрытия при накачке через собственную ТЕ моду МР при угле падения  $\sim 54^\circ$  примерно в 50 раз превосходит его величину при накачке через фотонную зону при угле падения  $20^\circ$ . Полученное значение совпадает по порядку величины с экспериментально наблюдаемым 25-кратным возрастанием ФЛ ионов эрбия в исследованном МР.

Таким образом, экспериментально реализован эффективный способ увеличения интенсивности фотolumинесценции люминофора, находящегося в активном слое планарного микрорезонатора. Этот способ объединяет возбуждение излучающих центров через одну собственную моду микрорезонатора с выводом излучения через другую его моду. В результате мультипликативного действия двух процессов — резонансного возрастания фотolumинесценции и резонансного поглощения возбуждающего излучения в спектральной области собственных мод микрорезонаторной структуры на основе слоев  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiO}_x$  — наблюдалось увеличение интенсивности спонтанной эмиссии ионов эрбия в активном слое микрорезонатора больше чем на два порядка величины по сравнению с одиночной пленкой  $a\text{-SiO}_x(\text{Er})$ .

Авторы выражают благодарность С.А. Грудинкину за определение концентрации гидроксильных групп в образцах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-17803) и ЕС проекта PHOREMOST (FP6/2003/IST-2-511616).

## Список литературы

- [1] *Vahala K.J.* // *Nature*. 2003. V. 424. P. 839–846.
- [2] *Weisbuch C., Benisty H., Houdre R.* // *J. Lumin.* 2000. V. 85. P. 271–293.
- [3] *Schubert E.F., Hunt N.E.J., Vredenberg A.M., Harris T.D., Poate J.M., Jacobson D.C., Wong Y.H., Zyzik G.J.* // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63. P. 2603–2605.

- [4] *Dukin A.A., Feoktistov N.A., Golubev V.G., Medvedev A.V., Pevtsov A.B.* // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. P. 3009–3011.
- [5] *Голубев В.Г., Дукин А.А., Медведев А.В., Певцов А.Б., Селькин А.В., Феоктистов Н.А.* // ФТП. 2001. Т. 35. В. 10. С. 1266–1274.
- [6] *Kenyon A.J.* // Progress in Quantum Electronics. 2002. V. 26. P. 225–284.
- [7] *Polman A.* // Nature Materials. 2002. V. 1. P. 10–12.
- [8] *Born M., Wolf E.* Principles of Optics. Oxford: Pergamon, 1975.
- [9] *Feng X., Tanabe S., Hanada T.* // J. Non-Cryst. Sol. 2001. V. 281. P. 48–54.
- [10] *Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N.* Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1995.