

## СПЕКТРЫ УСИЛЕНИЯ В ИТТЕРБИЙ-ЭРБИЕВЫХ МЕТАФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ ДЛЯ МИКРОЛАЗЕРОВ

© 2008 г. В. А. Асеев\*, А. С. Златов\*, Н. В. Никоноров\*, доктор физ.-мат. наук;  
А. К. Пржеvusский\*, доктор физ.-мат. наук; Ю. К. Федоров\*\*, канд. техн. наук

\* НИИ “Оптоинформатика”, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

\*\* Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения  
ВНЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: Aseev@oi.ifmo.ru, Zlatov@oi.ifmo.ru

Проведены прямые измерения спектров усиления/потерь для основного перехода иона эрбия (1,5 мкм) в иттербий-эрбиевых фосфатных стеклах в зависимости от концентрации ионов иттербия и мощности лазерной накачки. Концентрация иттербия изменялась от 0 до предельного значения  $52,4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Показано, что увеличение концентрации иттербия начиная с концентрации  $N_{\text{Yb}} = 20,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  приводит к снижению порога усиления. На стекле с предельной концентрацией иттербия (метафосфате иттербия) достигнута инверсия населенности при малых мощностях накачки 35 мВт. Наибольший коэффициент усиления  $0,1 \text{ см}^{-1}$  получен на образце толщиной 0,5 мм с концентрациями иттербия  $41,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и эрбия  $0,29 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  при поглощенной мощности накачки 210 мВт.

Коды OCIS: 140.3070, 140.3380, 140.3500.

Поступила в редакцию 25.10.2007.

### Введение

Иттербий-эрбиевые стекла широко используются в качестве активной среды в лазерах и оптических усилителях. Это связано с тем, что длина волны генерации иона эрбия (1,5 мкм) является, во-первых, оптимальной для передачи информации по волоконно-оптическим линиям связи, во-вторых, лежит в безопасном для глаз диапазоне длин волн [1]. Ион иттербия дополнительно вводится в стекло для повышения эффективности накачки, поскольку является сенситизатором для иона эрбия, а также имеет интенсивную полосу поглощения в области 1 мкм, что позволяет использовать для накачки мощные полупроводниковые лазерные диоды [1, 2].

Типичные концентрации ионов иттербия, например, в коммерческих иттербий-эрбиевых лазерных фосфатных стеклах, составляют  $(19-21) \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  [3-5]. Такие концентрации ионов иттербия позволяют осуществлять эффективную накачку и передачу возбуждения для концентраций ионов эрбия вплоть до  $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  [2]. Дальнейшее увеличение концентрации ионов эрбия приводит к снижению эффективности безызлучательного переноса от иттербия к эрбию, что, наряду с другими факторами, например, ап-конверсией, концентрационным тушением, снижает эффективность лазера. Увеличение же концентрации иттербия может снизить пороги генерации, увеличить предельные концентрации ионов эрбия и улучшить генерационные свойства

лазеров, работающих в режиме модулированной добротности [6]. Однако работы по созданию и исследованию спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик стекол с высокими (более  $21 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) концентрациями ионов иттербия отсутствуют. Особый же интерес представляют среды с предельными содержаниями активаторов. Например, метафосфат иттербия – среда, где ион иттербия входит в основную структуру стеклообразующей сетки. Работы, посвященные исследованию спектрально-люминесцентных свойств метафосфата иттербия, активированного эрбием, также отсутствуют.

В настоящей работе были синтезированы стекла, активированные ионами эрбия и иттербия вплоть до предельных концентраций ( $N_{\text{Yb}} = 52,4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ). Проведены исследования спектров усиления/потерь для основного лазерного перехода на 1,5 мкм в иттербий-эрбиевых фосфатных стеклах в зависимости от концентрации ионов иттербия и мощности лазерной накачки.

### Объект исследования и методика эксперимента

В работе синтезированы эрбиевые метафосфатные стекла в системе  $75\text{P}_2\text{O}_5-25\text{RE}_2\text{O}_3$  мол.%, где  $\text{RE}_2\text{O}_3 = \text{La}_2\text{O}_3, \text{Yb}_2\text{O}_3, \text{Er}_2\text{O}_3$ . Стекла с переменным содержанием ионов иттербия были синтезированы в кварцевых тиглях при температурах 1450–1550 °С

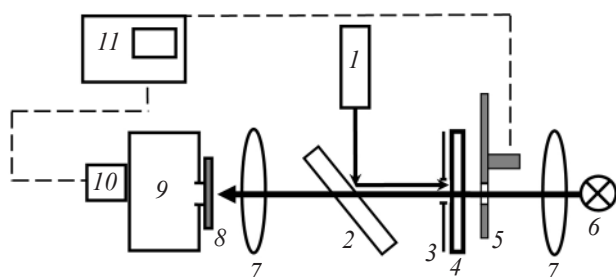
### Иттербиевый фосфатный ряд

№ образца	$N_{Er} \times 10^{-20}, \text{ см}^{-3}$	$N_{Yb} \times 10^{-20}, \text{ см}^{-3}$
0		0
1		10,5
2		20,9
3	0,29	31,4
4		41,7
5		52,4

и отожжены при температурах 550–600 °С в зависимости от состава. В ходе варки все стекла были обезвожены путем барботирования кислородом через кварцевую трубку. После обезвоживания расплавы осветляли в течение 90 мин для удаления пузырей, затем отливали в графитовые формы и отжигали.

В работе был получен следующий концентрационный ряд метафосфатных стекол:  $75\text{P}_2\text{O}_5 - (24,75 - x)\text{La}_2\text{O}_3 - x\text{Yb}_2\text{O}_3$ , где  $x = 0, 5, 10, 15, 20, 24,75$  мол.%. Концентрация оксида эрбия составляла во всех случаях 0,25 мол.%, а концентрация ионов иттербия изменялась от 0 до максимально возможной  $N_{Yb} = 52,4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  за счет замещения ионов лантана при постоянной концентрации ионов эрбия ( $N_{Er} = 0,29 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) (см. таблицу). Таким образом, первое стекло в этом ряду представляло собой метафосфат лантана, а последнее – метафосфат иттербия. Размеры сечения образцов составляли  $10 \times 10$  мм. Толщина выбиралась в зависимости от концентрации ионов иттербия и изменялась в пределах 0,3–2,7 мм.

Прямые измерения спектров усиления/потерь проводились на установке, показанной на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для измерения спектров поглощения из основного и возбужденного состояний. 1 – полупроводниковый лазер, 2 – полупрозрачное зеркало, 3 – диафрагма, 4 – объемный образец, 5 – модулятор, 6 – лампа накачки ( $\lambda_{\text{зонд}} = 1,4\text{--}1,7$  нм), 7 – линза, 8 – светофильтр, 9 – монохроматор, 10 – InGaAs-приемник, 11 – синхронный усилитель.

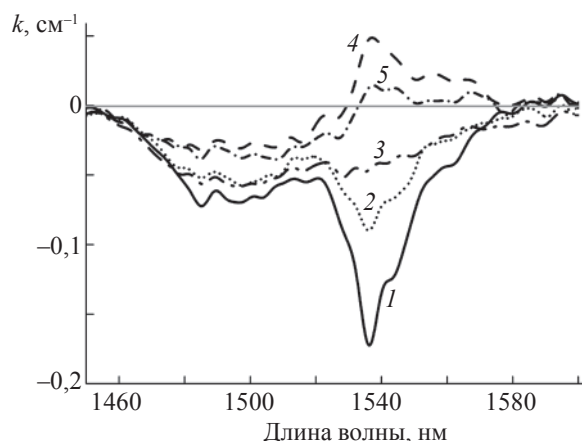
Для накачки образца 4 использовалось лазерное излучение от полупроводникового лазера 1 (LDD-10 ЗАО “Полупроводниковые приборы”) непрерывного действия с максимальной мощностью 1 Вт. Накачка осуществлялась на длине волны 980 нм. Мощность лазерного излучения изменялась от 50 до 590 мВт. В качестве зонда использовалось излучение от лампы 6, которое, проходя через монохроматор 9, регистрировалось InGaAs-приемником 10. Далее сигнал передавался на синхронный усилитель 11 и обрабатывался на компьютере. Все измерения проводились при комнатной температуре.

В работе были проведены прямые измерения спектров усиления/потерь для различных уровней накачки по методике [7]. Накачка  $N_2/N_{Er}$  (где  $N_2$  – населенность уровня  $^4I_{13/2}$ ,  $N_{Er}$  – концентрация ионов эрбия в стекле) определялась по измерениям изменения поглощения из возбужденного состояния [7].

### Результаты и обсуждения

Экспериментальные зависимости спектров усиления/потерь при различных поглощенных мощностях накачки ( $P_{\text{погл}}$ ) для образца с концентрацией эрбия  $0,29 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и иттербия  $20,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  (образец № 2) показаны на рис. 2. При увеличении мощности накачки сначала происходит просветление, затем, при мощностях более 150 мВт, проходящий через накачанную область сигнал начинает усиливаться, т. е. коэффициент усиления  $k > 0$ .

Для исследования влияния концентрации ионов иттербия на коэффициент усиления были взяты значения коэффициента усиления на длине волны 1535 нм и для всех образцов построены его зависи-



**Рис. 2.** Зависимости спектров усиления/потерь при различных мощностях поглощенного излучения накачки (образец № 2). 1 – 0, 2 – 35, 3 – 80, 4 – 150, 5 – 300 мВт.  $N_{Yb} = 20,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{Er} = 0,29 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

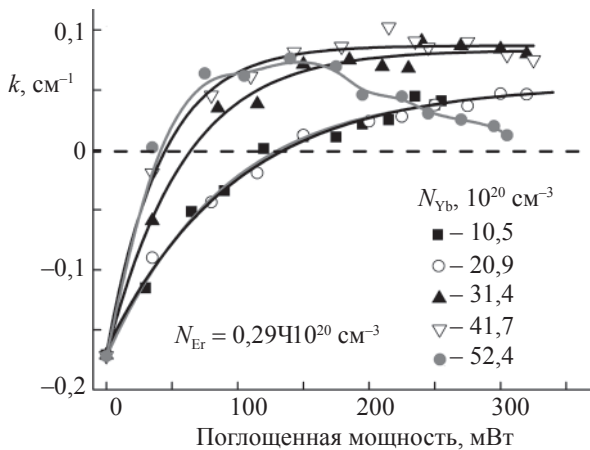


Рис. 3. Зависимости коэффициента усиления от мощности накачки.

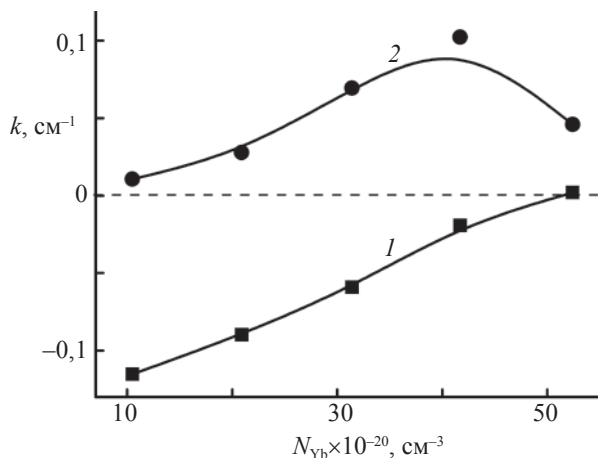


Рис. 4. Зависимости коэффициента усиления от концентрации ионов иттербия при мощности накачки 35 (1) и 210 мВт (2).

мости от мощности поглощенного излучения накачки (рис. 3).

Из рис. 3. видно, что для образцов 1 и 2, имеющих типичную для коммерческих иттербий-эрбиевых лазеров концентрацию эрбия  $0,29 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и иттербия  $10,5 \times 10^{20}$  и  $20,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , зондирующий сигнал начинает усиливаться ( $k > 0$ ) при поглощенных мощностях накачки более 150 мВт и достигает максимального значения  $0,05 \text{ см}^{-1}$  при мощностях накачки 300–350 мВт. Увеличение концентрации иттербия ( $N_{\text{Yb}} > 20,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) приводит к снижению порога усиления. Так, для концентрации  $N_{\text{Yb}} = 41,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  коэффициент усиления  $k > 0$  при мощности накачки 50 мВт и достигает максимального значения  $k = 0,08\text{--}0,1 \text{ см}^{-1}$  при мощности накачки 200 мВт. Дальнейшее увеличение мощности накачки до 300 мВт

практически не приводит к увеличению коэффициента усиления. При максимальной концентрации иттербия ( $N_{\text{Yb}} = 52,4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) усиление ( $k > 0$ ) наблюдается уже при поглощенной мощности накачки 35 мВт. Максимальный коэффициент усиления для этой предельной концентрации достигает значения  $0,07 \text{ см}^{-1}$  при мощности накачки 70 мВт. Однако при мощностях выше 150 мВт происходит снижение коэффициента усиления. Так, при мощности накачки 300 мВт коэффициент усиления снижается до  $0,01 \text{ см}^{-1}$ .

Зависимости коэффициента усиления от концентрации ионов иттербия для двух значений поглощенной мощности накачки представлены на рис. 4. При малой накачке (35 мВт) коэффициент усиления отрицателен и практически линейно зависит от концентрации иттербия. При большой накачке (210 мВт) коэффициент усиления положителен уже при малых концентрациях. Увеличение концентрации иттербия до  $41,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  ведет к росту коэффициента усиления до  $0,1 \text{ см}^{-1}$ . Дальнейшее повышение концентрации, т. е. переход к метафосфату иттербия, приводит к резкому снижению коэффициента усиления.

Возможными причинами снижения коэффициента усиления при больших концентрациях иттербия и высоких мощностях накачки (рис. 3 и 4) являются нагрев образца за счет увеличения концентрации активатора [8], а также увеличение обратного переноса энергии с эрбия на иттербий. Однако эти предположения нуждаются в дальнейших исследованиях.

## Выводы

В работе впервые проведены комплексные исследования влияния концентрации иттербия и поглощенной мощности накачки на спектры усиления/потерь эрбия в области 1,5 мкм в иттербий-эрбиевых фосфатных стеклах. Концентрация иттербия изменялась от 0 до предельного значения  $52,4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , а поглощенная мощность от 25 до 350 мВт. Показано, что увеличение концентрации иттербия начиная с концентрации  $N_{\text{Yb}} = 20,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  приводит к снижению порога усиления. Стекло с предельной концентрацией иттербия (метафосфат иттербия) имеет положительный коэффициент усиления при малых мощностях накачки 35 мВт. Показано, что увеличение мощности накачки приводит к немономонному изменению коэффициента усиления у метафосфата иттербия. Наибольший коэффициент усиления  $0,1 \text{ см}^{-1}$  получен на образце толщиной 0,5 мм с концентрациями иттербия  $41,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и эрбия  $0,29 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  при поглощенной мощности накачки 210 мВт.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы” по лоту 4 (мероприятие 1.3 Программы)”, шифр 2007-3-1.3-24-01-177, государственный контракт № 02.513.11.3100, а также в рамках реализации в СПбГУ ИТМО образовательной программы “Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий”.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Desurvire E.* Erbium-doped fiber amplifiers. N. Y.: Wiley, 1994.
2. *Алексеев Н.Е., Гапонцев В.П., Жаботинский М.Е., Кравченко В.Б., Рудницкий Ю.П.* Лазерные фосфатные стекла. М.: Наука, 1980. 352 с.
3. *Lunter S.G., Fyodorov Yu K.* Development of erbium laser glasses // Proc. of F. Simp. Light materials, Laser Technology material for Optic Telecomm. 1994. V. 2. P. 327–333.
4. Schott Glass Technologies “IOG-1 laser glasses”.
5. Kigre Inc. “QX-type glass”.
6. *Georgiou E., Musset O., Boduqillon J-P, Denker B., Sverchkov S.E.* 50mJ/30ns FTIR Q-switched diode pumped Er:Ybglass 1,54  $\mu\text{m}$  laser // Opt. Comm. 2001. V. 198. P. 147–153.
7. *Асеев В.А., Никоноров Н.В., Пржевуский А.К., Чухарев А.В., Рохмин А.С.* Измерение спектров усиления/потерь в высококонцентрированных лазерных стеклах/активированных иттербий-эрбием // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 11. С. 18–22.
8. *Nikonorov N.V., Przhevuskii A.K., Chukharev A.V.* Characterization of non-linear upconversion quenching in Er-doped glasses: modeling and experiment // J. of Non-Crystalline Solids. 2003. V. 324. P. 92–108.