

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНЫХ НАНОСТЕКЛОКЕРАМИК, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ И ЭРБИЯ

© 2008 г. В. А. Асеев; Н. В. Никоноров, доктор физ.-мат. наук

НИИ нанофотоники и оптоинформатики, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: Aseev@oi.ifmo.ru

Впервые проведены комплексные исследования спектрально-люминесцентных и лазерных свойств высококонцентрированных фототерморефрактивных наностеклокерамик, активированных ионами иттербия и эрбия, для интегрально-оптических усилителей и мини-лазеров. Установлены предельные концентрации эрбия, при которых наблюдается усиление, и исследовано влияние мощности накачки на коэффициент усиления.

Коды OCIS: 140.3070, 140.3380, 140.3500.

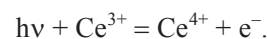
Поступила в редакцию 26.06.2008.

Введение

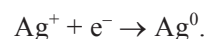
На современном этапе развития оптической связи и фотоники требуются новые, чаще всего миниатюрные, оптические элементы, которые не могут быть в полной мере реализованы на основе традиционных материалов и технологий. Поэтому во всем мире большое внимание уделяется разработке оптических полифункциональных материалов. Оптические полифункциональные материалы – это новые оптические среды для решения задач, связанных с миниатюризацией и интеграцией оптической элементной базы современной фотоники. Оптические полифункциональные материалы объединяют в себе характеристики нескольких оптических сред и проводят разные функциональные операции со светом (генерацию, усиление, удвоение частоты, модуляцию, отклонение световых потоков, передачу, запись, обработку и хранение информационных потоков и т. д.). Так, например, в [1–3] разработан новый полифункциональный материал – лазерная фототерморефрактивная наностеклокерамика. Новая полифункциональная наностеклокерамика объединяет в себе свойства трех материалов: лазерного, фоточувствительного и ионообменного.

Полифункциональная наностеклокерамика создана на базе фототерморефрактивного (ФТР) материала. ФТР стекло – это многокомпонентное натриево-алюмоцинково-силикатное стекло, в состав которого входят фоточувствительные сенсibilизаторы церий и серебро, а также элементы, участвующие в процессе кристаллизации, – фтор и бром. Процесс фототермоиндуцированной кристаллизации в ФТР стекле заключается в следующем. Под действием УФ излучения He–Cd-лазера ($\lambda = 325$ нм), совпадающего с широкой полосой погло-

щения Ce^{3+} (305–330 нм), в стекле происходит фотоионизация Ce^{3+} с образованием свободных электронов по реакции



Освободившийся электрон захватывается на ловушках серебра Ag^{+} с образованием атомарного серебра



Нагрев стекла до 400 °С приводит к агрегации атомарного серебра и образованию коллоидных частиц серебра Ag_n^0 . В свою очередь, коллоидные частицы серебра выполняют роль центров кристаллизации. При температурах, близких к температуре стеклования ($T_g = 490$ °С) и выше, на этих зародышах происходит рост нанокристаллов сложного состава $AgBr-NaF$. Доза УФ облучения определяет концентрацию коллоидных частиц серебра и, соответственно, концентрацию нанокристаллов, а температура и время термической обработки (термопроявление) определяют размер нанокристаллов и объемную долю кристаллической фазы. Размер кристаллов составляет 20–40 нм. Это позволяет существенно снизить уровень светорассеяния в гетерофазных стеклокерамиках, в которых коэффициент ослабления составляет менее $0,01$ см⁻¹ [3]. Прозрачные в широкой области спектра (350–3500 нм) стеклокерамики за счет наноразмерной кристаллической фазы получили название “наностеклокерамик” [1, 2]. Разность показателей преломления стеклофазы и кристаллической фазы достигает $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$ и позволяет записывать высокоэффективные объемные фазовые голограммы [3]. Матрица ФТР стекла допускает легирование материала редкоземельными ионами (например, эрбием, иттербием и т. д.), и, таким образом, материал может обладать свой-

ствами лазерной среды. Так, например, на основе лазерной ФТР наностеклокерамики становится возможной реализация планарного волноводного оптического усилителя или микролазера на $\lambda = 1,55$ мкм в виде монолитной интеграции. То есть на едином материале-подложке может быть создан ряд оптических элементов, например, волноводный мультиплексор для смешения сигнального канала на длине волны 1,55 мкм и канала накачки на $\lambda = 0,98$ мкм, волноводный лазер или оптический усилитель, брэгговские зеркала, внутррезонаторные фильтры, спектральные селекторы и т. д.

В настоящей работе проведены комплексные исследования спектрально-люминесцентных свойств лазерных фототермофрактивных наностеклокерамик, активированных ионами эрбия и иттербия.

Объект исследования и эксперимент

В работе были синтезированы исходные ФТР стекла системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. Стекла содержали фоточувствительные добавки серебра и церия, а также добавки фтора и брома, определяющие кристаллизационную способность стекла. Кроме того, в исходные ФТР стекла были введены оксиды редких земель эрбия и иттербия. Концентрация ионов иттербия была постоянной и составляла $17,8 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Концентрация ионов эрбия изменялась в пределах от 0 до $2,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Для подготовки наностеклокерамик активированные ФТР стекла подвергались УФ облучению He–Cd-лазера ($\lambda = 325$ нм) и последующей термообработке при $T = 520$ °C в течение 2 ч. В результате фототермоиндуцированной кристаллизации в активированной редкоземельными ионами эрбия и иттербия матрице стекла вырастали наноразмерные кристаллы NaF–AgBr.

Комплексные спектрально-люминесцентные исследования включали в себя определение следующих характеристик: параметры Джадда–Офельта [4, 5], сечение поглощения из основного состояния, сечение вынужденного излучения, времена затухания люминесценции ионов эрбия для перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (1535 нм) и ионов иттербия для перехода ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ (980 нм), квантовый выход люминесценции ионов Er^{3+} . По методике [6] проведены прямые измерения спектров усиления/потерь основного перехода ионов эрбия ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ для различных уровней накачки.

Спектры поглощения стекол измерены с помощью спектрофотометра (Cary 500 фирмы “Varian”) в спектральном диапазоне 300–3000 нм. Анализ Джадда–Офельта проведен на основе определения сечений поглощения для электрических дипольных

переходов и расчета трех параметров Ω_t ($t = 2, 4, 6$). С помощью этих параметров была определена вероятность спонтанного перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$

$$A_{ij} = 64\pi^4 e^2 v^3 (n(n^2 + 2)^2) \times (S(SLJ \rightarrow S'L'J')) / [18h(2J + 1)], \quad (1)$$

где v – частота максимума полосы поглощения, n – показатель преломления, h – постоянная Планка, J – кратность вырождения уровня, с которого осуществляется переход; $S(SLJ \rightarrow S'L'J')$ сила линии перехода с уровня ${}^4I_{13/2}$ на уровень ${}^4I_{15/2}$. Далее было определено радиационное время жизни люминесценции τ_{rad} как величина, обратная вероятности спонтанного перехода.

Спектры флюоресценции возбуждались излучением ($\lambda_{\text{pump}} = 975$ нм) непрерывного титан-сапфирового лазера (модель 3900 фирмы “Spectra Physics”), управляемого неодимовым лазером с удвоением частоты ($\lambda_{\text{pump}} = 532$ нм) (модель Millennia-Xs фирмы “Spectra Physics”). Излучение накачки модулировалось с частотой 12 Гц, его мощность измерялась пироэлектрическим приемником фирмы “Kimmon Electric Co”. Спектры флюоресценции записаны с использованием монохроматора (модель Acton-300 фирмы “Acton Research Corporation”) и ИК InGaAs-приемника (модель ID-441 фирмы “Acton Research Corporation”). Сигналы от приемника усиливались и обрабатывались с помощью цифрового синхронного усилителя (модель SR850 фирмы “Stanford Research Systems”). Сечения вынужденного излучения рассчитывались из спектров поглощения методом МакКамбера [7].

Для измерения кинетики затухания люминесценции использовалось излучение импульсного лазера LQ-129 фирмы “Solar Laser system” ($\lambda_{\text{pump}} = 975$ нм, длительность импульса $\tau \approx 11$ нс). Кривые затухания люминесценции регистрировались цифровым запоминающим осциллографом (модель Infinium HP54830 фирмы “Agilent Technologies”). Далее время жизни определялось через отношение площади под кривой затухания к ее амплитуде. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Вероятность безызлучательной передачи возбуждения с иона иттербия на эрбий (η) определялась по формуле

$$\eta = 1 - (\tau_{\text{Yb-Er}} / \tau_{\text{Yb}}), \quad (2)$$

где τ_{Yb} – экспериментально определенное время жизни люминесценции перехода ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ образца, не содержащего ионы эрбия; $\tau_{\text{Yb-Er}}$ – экспериментально определенное время жизни люминесценции перехода ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ образца, содержащего ионы эрбия и иттербия.

Для измерения населенности метастабильного уровня Er^{3+} нами использовался метод, разработанный ранее в [6]. Определение населенности метастабильного уровня N_2 осуществлялось по двум методикам. Первая основана на измерении изменения поглощения из основного состояния (ПОС) ($\Delta k_{\text{ПОС}}$) для сверхчувствительного перехода ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ в спектральной области около 520 нм и исходя из предположения, что $N_2 = \Delta N_1$ (ΔN_1 – это обеднение основного уровня ${}^4I_{15/2}$). Вторая – на измерении поглощения из возбужденного состояния (ПВС) ($\Delta k_{\text{ПВС}}$) для сверхчувствительного перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$ в спектральной области 478 нм. Изменение показателя поглощения рассчитывалось по формуле:

$$k = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_{\text{laserON}}}{I_{\text{laserOFF}}} \right), \quad (3)$$

где d – толщина образца, I_{laserON} – зондирующий сигнал лампочки при лазерной накачке, I_{laserOFF} – зондирующий сигнал лампочки без накачки.

Для вычисления инверсии населенности N_2/N_{Er} (или $\Delta N_1/N_{\text{Er}}$, так как в данном случае $N_2 = \Delta N_1$) при переходе ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ применялась формула

$$\frac{N_2}{N_{\text{Er}}} = \frac{\Delta N_1}{N_{\text{Er}}} = \frac{\Delta k_{\text{ПОС}}}{k_{0\text{ПОС}}}, \quad (4)$$

где ΔN_1 – обеднение основного уровня ${}^4I_{15/2}$ при накачке, $\Delta k_{\text{ПОС}}$ – изменение коэффициента поглощения при лазерной накачке в максимуме полосы ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$, $k_{0\text{ПОС}}$ – максимальный коэффициент поглощения без накачки.

Для определения инверсии населенности N_2/N_{Er} при накачке ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$ используется формула

$$\frac{N_2}{N_{\text{Er}}} = \frac{\int k_{\text{ПВС}}(v) dv}{\int \sigma_{\text{ПВС}}(v) dv}, \quad (5)$$

где $\int k_{\text{ПВС}}(v) dv$ – интегральный коэффициент наведенного поглощения полосы ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$, $\int \sigma_{\text{ПВС}}(v) dv$ – интегральное сечение наведенного поглощения этого перехода.

При определении $\int k_{\text{ПВС}}(v) dv$ необходимо было изменение показателя поглощения (k), рассчитываемого по формуле (1), поделить на концентрацию иона активатора Er^{3+} .

Интегральное сечение наведенного поглощения $\int v \sigma_{\text{ПВС}}(v) dv$ определялось с использованием теории Джадда–Офельта. Для этого по определенным ранее параметрам Джадда–Офельта [4, 5] рассчитывается сила линии возбужденного поглощения

$$S_{\text{ПВС}}({}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}) = \Omega_2 V^{(2)} + \Omega_4 V^{(4)} + \Omega_6 V^{(6)}, \quad (6)$$

где $\Omega_2, \Omega_4, \Omega_6$ – параметры Джадда; $V^{(2)}, V^{(4)}, V^{(6)}$ – приведенные множители.

Полученное значение силы линии подставляется в соотношение (7), по которому и определяется интегральное сечение полосы возбужденного поглощения ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$

$$\int \sigma_{\text{ПВС}}(v) dv = \frac{S_{\text{ПВС}}({}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4G_{9/2})}{(3hc/8\pi^3 e^2)((2J+1)/\tilde{\nu}_{\text{ПВС}})(9n/(n^2+2)^2)}, \quad (7)$$

где $\tilde{\nu}_{\text{ПВС}}$ – максимум полосы поглощения из возбужденного состояния [см^{-1}], $h = 6,6238 \times 10^{-27}$ [эрг с], $e = 4,8022 \times 10^{-10}$ [эрг], $c = 2,998 \times 10^{10}$ (см/с), n – показатель преломления исследуемого образца.

Измерения изменения поглощения из основного $\Delta k_{\text{ПОС}}$ и возбужденного $\Delta k_{\text{ПВС}}$ состояний проводились на установке, показанной на рис. 1. Для накачки образцов 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 (Oriel), которое, проходя через монохроматор 9 (Spectra Pro 500i), регистрировалось ФЭУ 10. Далее сигнал передавался на синхронный усилитель 11 (модель SR850 DSP) и обрабатывался на компью-

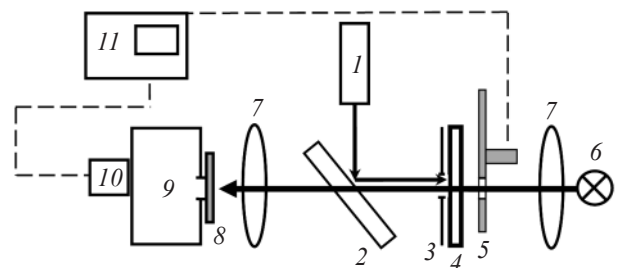


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения спектров поглощения из основного и возбужденного состояний. 1 – полупроводниковый лазер ($\lambda_{\text{нак}} = 980$ нм), 2 – полупрозрачное зеркало ($R_{\text{макс}} = 975$ нм), 3 – диафрагма, 4 – объемный образец, 5 – модулятор, 6 – лампа накаливания ($\lambda_{\text{зонд}} = 1,4\text{--}1,7$ нм), 7 – положительные линзы, 8 – светофильтр, 9 – монохроматор, 10 – InGaAs-приемник, 11 – синхронный усилитель.

ютере. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Спектры усиления/потерь были измерены путем регистрации прошедшего через накачанную область зондирующего излучения лампы накаливания ($\lambda = 1,4\text{--}1,7$ мкм) [6]. Для этого диафрагмой малого диаметра (0,2 мм) в образце выделялся объем, через который одновременно пропускались зондирующее излучение и накачка. В зависимости от мощности накачки зондирующее излучение либо ослабляется – спектры потерь, либо усиливается – спектры усиления.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны спектры ослабления ФТР наностеклокерамики, активированной эрбием, до обработки, а также после УФ облучения (325 нм) и вторичной термообработки (520 °С, в течение 2 ч). Приведенные спектры позволяют отметить ряд особенностей.

1) Фоточувствительная полоса трехвалентного церия, лежащая в районе 305–315 нм, не перекры-

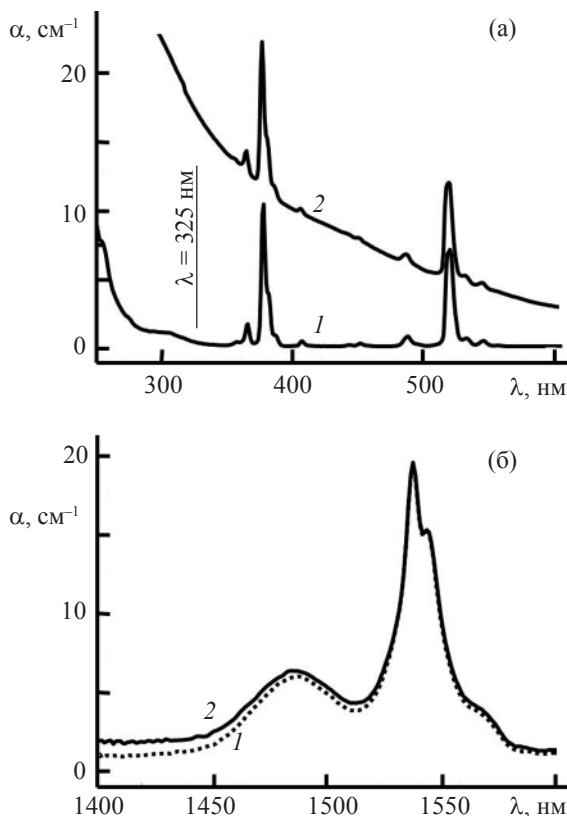


Рис. 2. Спектры ослабления эрбиевой ФТР наностеклокерамики до (1) и после (2) облучения и вторичной термообработки. а – в УФ и видимой областях спектра, б – в ИК области спектра.

вается с полосами поглощения эрбия (рис. 2а). Используемое УФ излучение He–Cd-лазера на $\lambda = 325$ нм попадает в край полосы трехвалентного церия и также не перекрывается с полосами поглощения эрбия в УФ области спектра. Таким образом, введение ионов эрбия в ФТР стекло не изменяет его фоточувствительные свойства.

2) Термообработка приводит к росту кристаллической фазы и увеличению коэффициента ослабления до нескольких обратных сантиметров в УФ и видимой областях спектра (рис. 2а), что обусловлено сильным рассеянием света на границе двух фаз – кристаллической и стеклообразной.

3) В ближней ИК области, в том числе на рабочей длине волны 1,55 мкм, вклад рассеяния очень мал. Наведенные потери составляют $0,01\text{--}0,05$ см⁻¹ и спектры ослабления до и после обработки практически совпадают (рис. 2б).

На рис. 3 представлены характерные зависимости сечения поглощения σ_{abs} и вынужденного излучения σ_{em} от длины волны, полученные методом МакКамбера [7]. Максимальные значения сечений составили $5,2 \times 10^{21}$ см⁻² и $5,54 \times 10^{21}$ см⁻² соответственно.

С увеличением концентрации Er³⁺ время жизни люминесценции τ и квантовый выход перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ уменьшаются (рис. 4), что обусловлено тушением возбуждения на ОН-группах [8, 9] и нелинейным ап-конверсионным тушением люминесценции [10–12]. Радиационное время жизни было рассчитано по методу Фюхтбауэра–Ланденбурга [13] и составило 15,6 мс. Максимальное значение квантового выхода люминесценции составляет 92% для образца с концентрацией ионов эрбия $0,26 \times 10^{20}$ см⁻³.

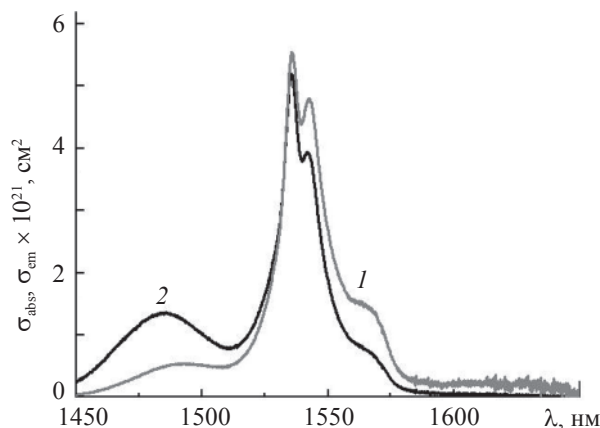


Рис. 3. Сечения поглощения σ_{abc} (1) и вынужденного излучения σ_{em} (2) для образца с концентрациями ионов активаторов $N_{\text{Er}} = 1,13 \times 10^{20}$ см⁻³, $N_{\text{Yb}} = 17,6 \times 10^{20}$ см⁻³.

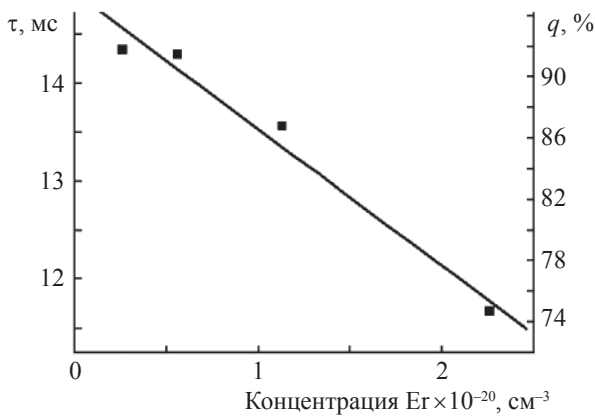


Рис. 4. Зависимость времени затухания люминесценции τ и квантового выхода люминесценции q от концентрации ионов эрбия N_{Er} для перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (1535 нм). $N_{Yb} = 17,6 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Накачка 975 нм.

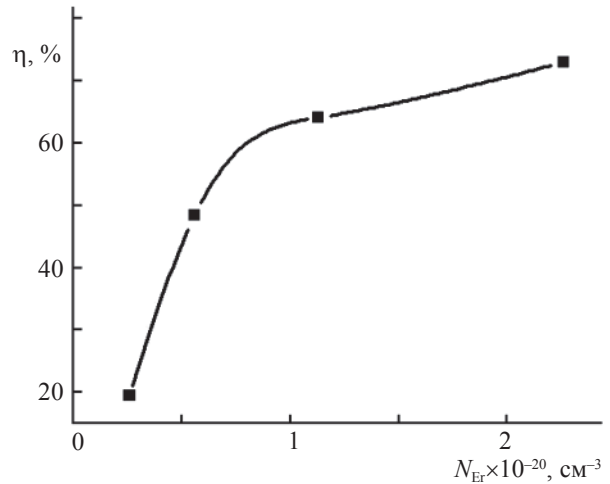


Рис. 5. Концентрационная зависимость вероятности безызлучательной передачи энергии от ионов иттербия к ионам эрбия. $N_{Yb} = 17,6 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Эффективность накачки ионов эрбия сильно зависит от эффективности передачи возбуждения с ионов иттербия на ионы эрбия. Время затухания люминесценции иттербия перехода ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ в образце, не содержащем эрбий, составило 1,05 мс. На рис. 5 показана концентрационная зависимость вероятности безызлучательной передачи возбуждения η с ионов иттербия к ионам эрбия.

При увеличении концентрации ионов эрбия происходит увеличение вероятности передачи энергии, которая достигает 74% в образце с максимальным содержанием ионов эрбия $2,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Это можно объяснить тем, что рост концентрации ионов активаторов приводит к уменьшению расстояния между ними, а вероятность безызлучательной передачи возбуждения нелинейно зависит от расстояния между ионами.

На рис. 6 показаны спектры полос поглощения из основного и возбужденного состояний иона эрбия для разных мощностей накачки.

При увеличении мощности накачки интенсивности полос поглощения с основного и возбужденного состояний возрастают, т. е. происходит расселение основного уровня и заселение метастабильного, полоса поглощения, соответствующая переходу ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$, уменьшается, а соответствующая переходу ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$ – растет. Максимальные значения этих изменений и сечения полос использовались для получения значений населенности. На рис. 7 показаны изменения N_2/N_{Er} для различных концентраций ионов эрбия.

Инверсия населенности достигается для образца с минимальными из исследуемых в данной работе концентрациями ионов эрбия ($0,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$) и составляет 52%. При более высоких концентра-

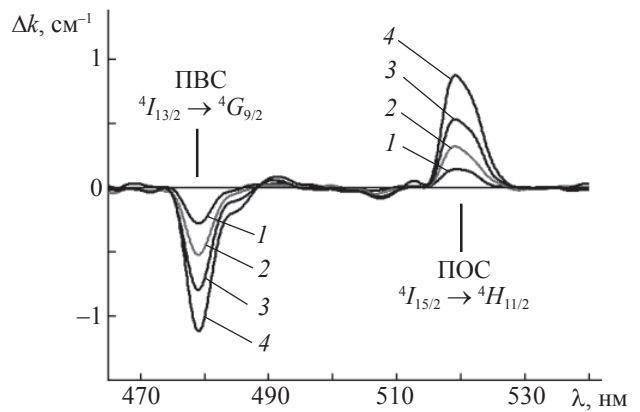


Рис. 6. Влияние мощности накачки на изменение полос поглощения Δk из основного (ПОС) и возбужденного (ПВС) состояний иона эрбия. Мощности накачки: 1 – 50, 2 – 110, 3 – 220, 4 – 590 мВт. $N_{Er} = 2,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_{Yb} = 17,6 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

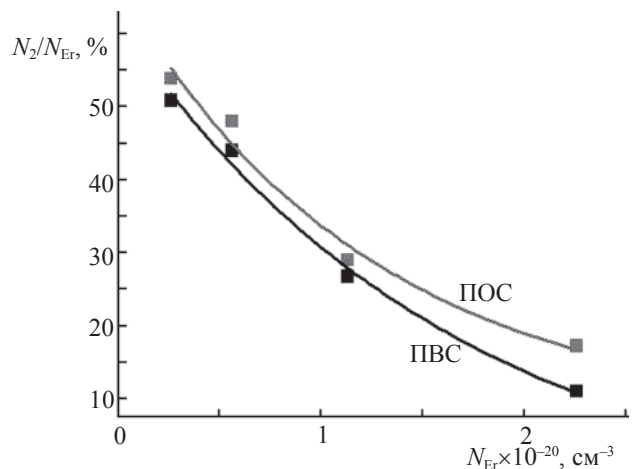


Рис. 7. Влияние концентрации эрбия N_{Er} на уровень накачки N_2/N_{Er} метастабильного уровня ${}^4I_{13/2}$. $N_{Yb} = 17,8 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $P = 590 \text{ мВт}$.

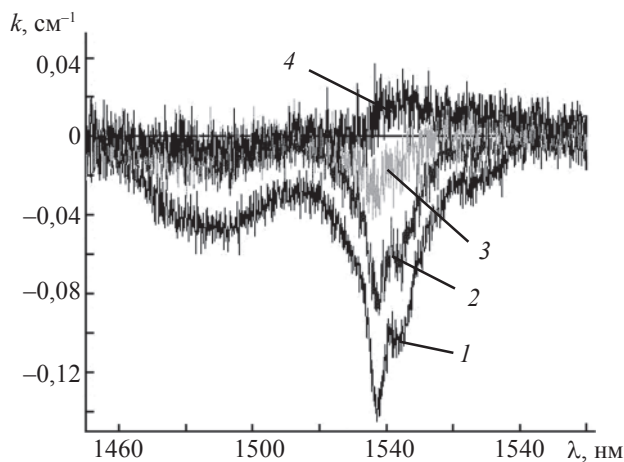


Рис. 8. Спектр усиления/потерь ФТР наностекло-керамики при различных значениях накачки N_2/N_{Er} . 1 – 0, 2 – 12, 3 – 30, 4 – 52%. $N_{Er} = 0,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_{yb} = 17,6 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

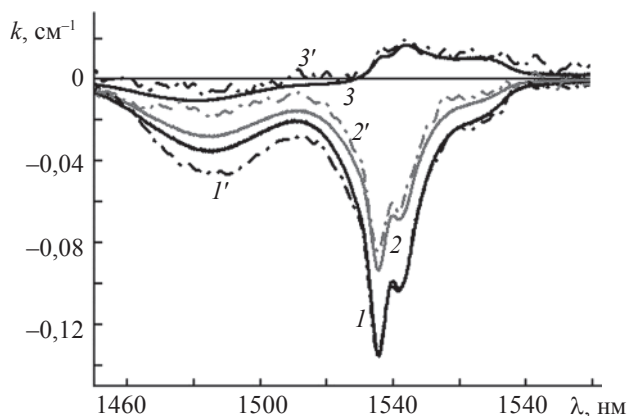


Рис. 9. Сравнение расчетного спектра усиления/потерь (1–3) и экспериментально полученного (1'–3') для эрбиевой ФТР наностеклокерамики при различных значениях накачки. 1, 1' – $N_2/N_{Er} = 0$; 2, 2' – 12; 3, 3' – 52%. $N_{Er} = 0,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_{yb} = 17,6 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

циях значительный вклад в снижение инверсии населенности вносит нелинейное ап-конверсионное тушение, поскольку такое тушение имеет нелинейный рост при увеличении концентрации ионов эрбия [10–12].

Экспериментальные спектральные зависимости коэффициента усиления/потерь при различных накачках приведены на рис. 8. С ростом накачки спектр поглощения трансформируется в спектр усиления.

Определив сечения поглощения и вынужденного излучения (рис. 3), можно получить расчетные спектры усиления [13]. Проведем сравнение расчет-

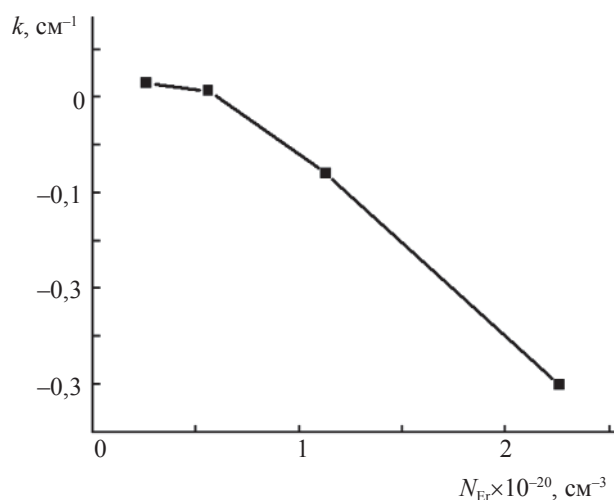


Рис. 10. Влияние концентрации эрбия на коэффициент усиления. $N_{yb} = 17,8 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $P = 590 \text{ мВт}$.

ных значений коэффициента усиления с экспериментальными (рис. 9). Видно, что эти спектры хорошо совпадают, т. е. два независимых метода дают одинаковый результат.

Увеличение концентрации ионов эрбия приводит к уменьшению коэффициента усиления (рис. 10). Усиление получено на образцах с минимальным содержанием ионов эрбия ($N_{Er} = 0,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $N_{Er} = 0,56 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$). Максимальное достигнутое значение коэффициента усиления составляет $0,014 \text{ см}^{-1}$.

В таблице приведены спектрально-люминесцентные и лазерные характеристики лазерной ФТР наностеклокерамики и коммерческого фосфатного стекла КГСС-0134. Видно, что свойства лазерной ФТР наностеклокерамики сопоставимы со свойствами коммерческого фосфатного стекла.

Выводы

Проведены комплексные измерения спектрально-люминесцентных и лазерных свойств фототерморелактивных наностеклокерамик, активированных эрбием и иттербием. Показано, что введение ионов эрбия в исходное фототерморелактивное стекло не изменяет его фоточувствительные свойства. Наведенные в процессе фототермоиндуцированной кристаллизации оптические потери в активированной наностеклокерамике не превышают $0,05 \text{ см}^{-1}$. Проведены прямые измерения населенности метастабильного уровня эрбия ($^4I_{13/2}$) в зависимости от концентрации ионов эрбия ($0,26\text{--}2,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$) и мощности лазерной накачки (50–590 мВт). Увеличение концентрации ионов Er^{3+} приводит к уменьшению населенности мета-

Характеристики	Лазерная ФРТ наностеклокерамика	Коммерческое фосфатное лазерное стекло КГСС-0134 [6, 8]
Концентрация Er, 10^{20} см^{-3}	0,56	0,5
Yb, 10^{20} см^{-3}	17,8	19
Интегральное сечение поглощения $\int \sigma_a(\nu) d\nu$, см	$7,4 \times 10^{-19}$	$1,3 \times 10^{-18}$
Максимальное сечение поглощения $\sigma_{\text{abs}}^{\text{max}}$, см^2	$5,1 \times 10^{-21}$	$6,5 \times 10^{-21}$
Интегральное сечение вынужденного излучения $\int \sigma_{\text{em}}(\nu) d\nu$, см	$7,2 \times 10^{-19}$	$1,2 \times 10^{-18}$
Максимальное сечение вынужденного излучения $\sigma_{\text{em}}^{\text{max}}$, см^2	$5,5 \times 10^{-21}$	$6,5 \times 10^{-21}$
Радиационное время жизни, мс	15,6	9,8
Квантовый выход, %	91	80
Вероятность безызлучательной передачи энергии от ионов иттербия к эрбию, %	48	86
Параметры Джадда, см^2		
Ω_2	$3,82 \times 10^{-20}$	$6,32 \times 10^{-20}$
Ω_4	$0,51 \times 10^{-20}$	$0,28 \times 10^{-20}$
Ω_6	$0,32 \times 10^{-20}$	$1,55 \times 10^{-20}$
Накачка N_2/N_{Er} , % (при мощности 590 мВт)	44	58
Коэффициент усиления, см^{-1}	0,006	0,05

стабильного уровня и коэффициента усиления, что связано с нелинейным ап-конверсионным тушением. Для образца с минимальным содержанием ионов эрбия ($N_{\text{Er}} = 0,26 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$) достигнута инверсия населенности 52% при мощности накачки 590 мВт. Коэффициент усиления при таких условиях составил $0,014 \text{ см}^{-1}$ для образца толщиной порядка 1 мм. Таким образом, иттербий-эрбиевые фототерморефрактивные наностеклокерамики обладают хорошими спектрально-люминесцентными и лазерными характеристиками, которые не уступают лучшим коммерческим фосфатным стеклам, активированным эрбием и иттербием.

Авторы выражают благодарность Атонен О.Е. и Тунимановой И.В. за помощь в синтезе активированных фототерморефрактивных стекол.

Работа выполнена в рамках реализации в СПбГУ ИТМО инновационной образовательной программы “Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий”, совместного российско-белорусского гранта РФФИ №08-02-90036-Бел_а, а также тематического плана НИР СПбГУ ИТМО, финансируемого Министерством образования и науки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никоноров Н.В. Оптическая полифункциональная наностеклокерамика // Белая книга “Исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокомпозитов в Российской Федерации”. М.: Изд. Совета Федерации Федерального собрания РФ, 2006. С.163–164.
2. Никоноров Н.В. Оптическая многофункциональная наностеклокерамика // Сборник докладов симпозиума “Нанопотоника”, 18–22 сентября 2007, Черноголовка, Московская обл., изд. ИПХФ РАН. С. 133–136.
3. Чухарев А.В. Спектрально-люминесцентные свойства эрбиевых фототерморефрактивных стекол для интегрально-оптических усилителей света // Автореф. канд. дис. СПб.: ЛИТМО, 2001. 18 с.
4. Judd B.R. Optical absorption intensities of rare earth ion // Phys. Rev. 1962. V. 127. № 3. P. 750–761.
5. Ofelt G.S. Intensities of crystal spectra of rare earth ion // J. Chem. Phys. 1962. V. 36. № 3. С. 511–520.
6. Асеев В.А., Никоноров Н.В., Пржеvusкий А.К., Чухарев А.В., Рохмин А.С. Измерение спектров усиления/потерь в высококонцентрированных лазерных стеклах, активированных иттербием-эрбием // Оптический журнал. 2003. Т.70. № 11. С. 18–22.
7. McCumber D.E. Theory of photon-terminated // Phys. Rev. 1964. V. 134. P. A299–A306.
8. 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.
9. Алексеев Н.Е., Гапонцев В.П., Жаботинский М.Е., Кравченко В.Б., Рудницкий Ю.П. Лазерные фосфатные стекла. М.: Наука, 1980. 352 с.

10. *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.
 11. *Hwang C., Jiang C., Luo T., Le Neindre L., Watson J., Peyghambarian N.* Characterization of cooperative upconversion and energy transfer of Er^{3+} and $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ doped phosphate glasses // *Proc. SPIE*. 1999. V. 3622. P. 10–18.
 12. *Sergeev S., Khoptyar D., Jaskorzynska B.* Upconversion and migration in erbium-doped silica waveguides in the continuous-wave excitations switch-off regime // *Phys Review B*. 2002. V. 65. № 23. P. 233104/1-4.
 13. *Desurvire E.* Erbium-doped fiber amplifiers. N. Y.: Wiley, 1994.
-