

УДК 547.97:535.8+541.147

ФТОРИДНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО С-ДИАПАЗОНА

К.В. Хайдуков, П.А. Демина, И.О. Горячук, В.И. Соколов

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Аннотация: Синтезированы фторидные нанокристаллы $\text{b-NaYF}_4:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$ в размерном диапазоне 40-50 нм, обладающие интенсивной фотолюминесценцией в телекоммуникационном С - диапазоне длин волн $\lambda = 1550 \pm 30$ нм при накачке ИК излучением с $\lambda = 980$ нм. Разработан метод введения нанокристаллов в полимерную матрицу в высокой концентрации. С использованием полученного композитного материала изготовлены волноводные усилители оптического излучения для С - диапазона спектра. Полученное усиление на длине волны $\lambda = 1532$ нм составило 19 дБ при длине волновода 15 мм.

Ключевые слова: фторидные нанокристаллы, редкоземельные элементы, фотолюминесценция, волноводные оптические усилители.

Введение

Фторидные нанокристаллы (NaYF_4 , NaLuF_4 , etc.), легированные ионами иттербия и эрбия, перспективны для создания компактных волноводных усилителей, работающих в телекоммуникационном С - диапазоне спектра вблизи 1550 нм. Для этого нанокристаллы вводятся в полимерную матрицу в высокой концентрации и полученный композитный материал используется для формирования одномодовых оптических волноводов [1-6]. Волноводные усилители могут использоваться, например, в высокоскоростных оптических шинах передачи данных для микропроцессорных вычислительных устройств на печатных платах [7]. Методом термического разложения трифторацетатов редкоземельных элементов и натрия в смеси олеиновой кислоты и 1-октадецена нами были синтезированы нанокристаллы $\text{b-NaYF}_4:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$ в размерном диапазоне 40-50 нм с инертной оболочкой из оксида кремния. Наночастицы были введены в фоторезист SU-8 в концентрации »40%, который использовался для формирования волноводов. При накачке ИК излучением 980 нм усиление на длине волны $\lambda = 1532$ нм в волноводе длиной 15 мм составило 19 дБ.

Экспериментальный раздел

Для синтеза фторидных нанокристаллов $b\text{-NaYF}_4:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$ использовались коммерческие реактивы: оксиды иттрия, иттербия, эрбия, карбонат натрия, олеиновая кислота 90%, 1-октадецен 90% (Sigma-Aldrich) и трифторуксусная кислота 99% (PanReac). Нанокристаллы были синтезированы по методике, описанной нами в работе [7]. Концентрация Er^{3+} в матрице $b\text{-NaYF}_4$ составляла $\approx 2\%$. На рисунке 1а представлена фотография синтезированных наночастиц, полученная с использованием ТЕМ электронного микроскопа, а на рисунке 1б - спектр их фотолюминесценции (ФЛ) в даун-конверсии, возбуждаемой ИК излучением 980 нм. Интенсивная полоса ФЛ с центром вблизи 1532 нм шириной 74 нм обусловлена переходами ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ в ионах Er^{3+} . Структурная диагностика полученных нанокристаллов, проведенная на рентгеновском дифрактометре Rigaku Miniflex600 ($\text{Cu}, \lambda = 1.54184 \text{ \AA}$), показала, что они имеют гексагональную b - фазу кристаллической решетки.

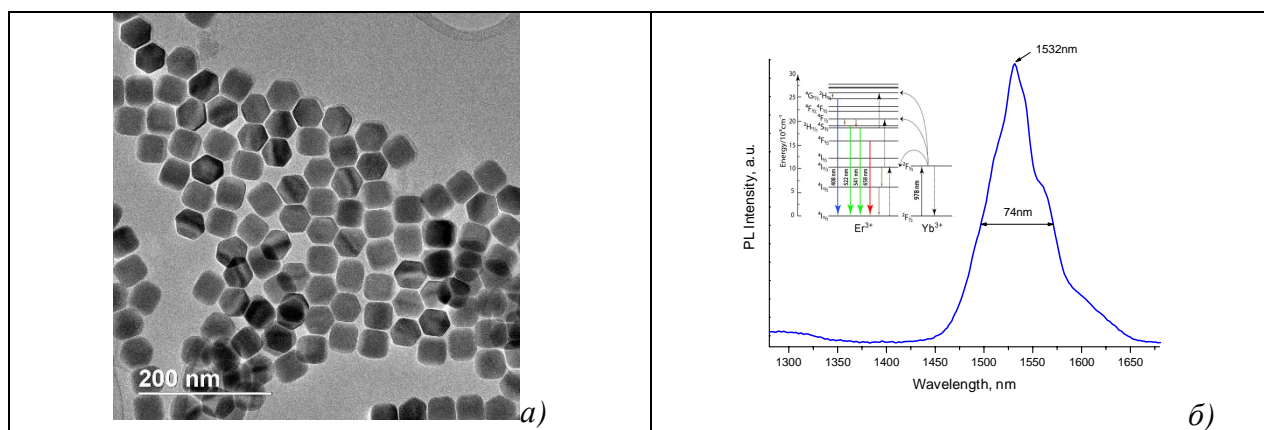


Рисунок 1. (а) ТЕМ фотография синтезированных фторидных нанокристаллов $b\text{-NaYF}_4:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$. (б) Спектр ФЛ нанокристаллов при накачке ИК излучением 980 нм. На вставке приведена упрощенная система энергетических уровней иттербия и эрбия.

Синтезированные наночастицы $b\text{-NaYF}_4:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$ были введены в фоторезистивный материал SU-8 в концентрации 40%. Полученный композитный материал использовался для формирования одномодовых оптических волноводов на подложке из кремния с термически выращенным оксидным слоем методом УФ фотолитографии (длина волны 365 нм). Ширина и толщина волновода составляли 6 x 6 мкм. На рисунке 2 показана измеренная зависимость коэффициента усиления оптического сигнала на длине волны 1532 нм в волноводе длиной 15 мм от мощности излучения накачки с $\lambda = 980$ нм. Как следует из рисунка 2, достигнутый коэффициент усиления составляет 19 дБ.

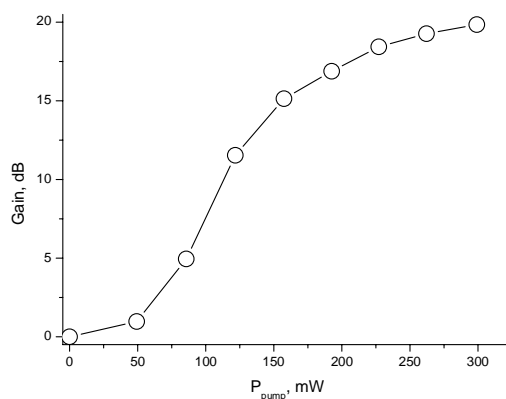


Рисунок 2. Зависимость коэффициента усиления (*Gain*) оптического сигнала на длине волны 1532 нм в волноводном усилителе длиной 15 мм от мощности излучения накачки P_{pump} с длиной волны 980 нм.

Заключение

Продемонстрирована возможность создания компактных волноводных усилителей для телекоммуникационного С - диапазона длин волн вблизи 1550 нм на основе фторидных нанокристаллов $b\text{-NaYF}_4:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$ с оболочкой из оксида кремния, введенных в фоторезист SU-8. Полученное усиление на длине волны 1532 нм в волноводе длиной 15 мм составило 19 дБ. Синтезированные нанокристаллы $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$ также перспективны для создания волноводных лазеров с распределенной обратной связью.

Благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Y. Fu, T. Sun, J. Li, Y. Tang, Y. Yang, S. Tao, F. Wang, D. Zhang, G. Qin, Z. Jia, D. Zhao, W. Qin, (S + C)-band polymer waveguide amplifier based on Tm^{3+} and Er^{3+} layer-doped core-shell nanoparticles, *Optics Letters*, **2023**, 48(2), 391.
2. X. Liu, M. Zhang, G. Hu, Gain Enhancement of the Optical Waveguide Amplifier Based on $\text{NaYF}_4/\text{NaLuF}_4:\text{Yb},\text{Er}$ NPs-PMMA Integrated with a Si_3N_4 Slot, *Nanomaterials*, **2022**, 12, 2937.
3. T. Sun, Y. Fu, X. Zhang, J. Yan, F. Wang, D. Zhang, Gain enhancement of polymer waveguide amplifier based on $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+},\text{Yb}^{3+}$ nanocrystals using backward pump scheme, *Optics Communications*, **2021**, 488, 126723.

4. H. Gao, H. Li, G.F.R. Chen, P. Xing, M.C. Tan, D.T.H. Tan, 3D printed and spiral lithographically patterned erbium-doped polymer micro-waveguide amplifiers, *Scientific Reports*, **2021**, 11, 21292.
5. Z. Zhou, J. Xue, B. Zhang, C. Wang, X. Yang, W. Fan, L. Ying, Z. Zheng, Y. Xie, Y. Wu, X. Yang, D. Zhang, Optical gain based on NaYF₄: Er, Yb nanoparticles-doped polymer waveguide under convenient LED pumping, *Appl. Phys. Lett*, **2021**, 118, 173301.
6. Y. Yang, F. Wang, S. Ma, M. Zhou, Y. Lang, G. Qin, D. Zhang, W. Qin, D. Zhao, X. Zhang, Great enhancement of relative gain in polymer waveguide amplifier using NaYF₄/NaLuF₄:Yb,Er-PMMA nanocomposite as gain media, *Polymer*, **2020**, 188, 122104.
7. В.И. Соколов, И.М. Ашарчук, И.О. Горячук, С.И. Молчанова, Синтез фторидных микро- и нанокристаллов NaYF₄/Yb/Tm, NaYF₄/Yb/Er и их характеристика методами УФ оптической микроскопии, *Fluorine Notes*, **2021**, 6(139), 7-8.