

**В.И. Соколов, И.М. Ашарчук, С.И. Молчанова, М.М. Назаров,
А.В. Нечаев, К.В. Хайдуков**

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

ОПТИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ С-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО ВОЛНОВОДА С ВНЕДРЕННЫМИ НАНОФОСФОРАМИ, ЛЕГИРОВАННЫМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Введение

Развитие интегральной оптики требует создания компактных волноводных усилителей, работающих в телекоммуникационном С-диапазоне длин волн 1530–1565 нм. Такие усилители могут быть реализованы путем внедрения в волновод ионов эрбия, имеющих широкую полосу фотолюминесценции (ФЛ) вблизи 1532 нм, при возбуждении светом с длиной волны 977 нм [1–6]. Они должны обладать высоким коэффициентом усиления при длине в несколько сантиметров, что значительно меньше длины существующих волоконных эрбиевых усилителей. Значительное усиление сигнала при малой длине требует повышения концентрации ионов эрбия в волноводе. Однако, это приводит к тушению ФЛ на переходах ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ вследствие диполь-дипольного взаимодействия между ионами Er^{3+} и явления апконверсии. Для создания усилителей мы использовали подход, заключающийся во введении в полимерную матрицу наноразмерных фосфоров $\beta-NaLuF_4$, легированных ионами Er^{3+} , Yb^{3+} и Ce^{3+} . Изготовлен волноводный усилитель из полимера SU-8 с внедренными нанофосфорами $\beta-NaLuF_4/Yb^{3+}/Er^{3+}/Ce^{3+}$, имеющий коэффициент усиления 1,1 дБ/см на длине волны 1530 нм.

1. Синтез нанофосфоров $\beta-NaLuF_4/Yb^{3+}/Er^{3+}/Ce^{3+}$

Нанофосфоры $\beta-NaLuF_4$ с ядром, легированным ионами Yb^{3+} , Er^{3+} , Ce^{3+} и оболочкой из нелегированного $\beta-NaLuF_4$ были синтезированы по методике, разработанной нами ранее [7]. Диаметр ядра частиц составлял 20 нм, толщина оболочки 5 нм. Концентрация редкоземельных элементов в ядре составляла $Lu : Yb : Er : Ce = 76\% : 20\% : 2\% : 2\%$. Легирование нанофосфоров иттербием обусловлено тем, что они обладают высоким коэффициентом поглощения вблизи 977 нм и способны эффективно передавать энергию ионам Er^{3+} , переводя последние на возбужденный уровень ${}^4I_{11/2}$. Легирование церием позволяет уменьшить апконверсию в ионах Er^{3+} за счет переноса энергии между уровнями ${}^4I_{11/2} (Er^{3+}) + {}^2F_{5/2} (Ce^{3+}) \rightarrow {}^4I_{13/2} (Er^{3+}) + {}^2F_{7/2} (Ce^{3+})$ и тем самым повы-

силь их ФЛ в С-диапазоне. Энергетическая структура ионов Yb^{3+} , Er^{3+} , Ce^{3+} представлена на рисунке 1.

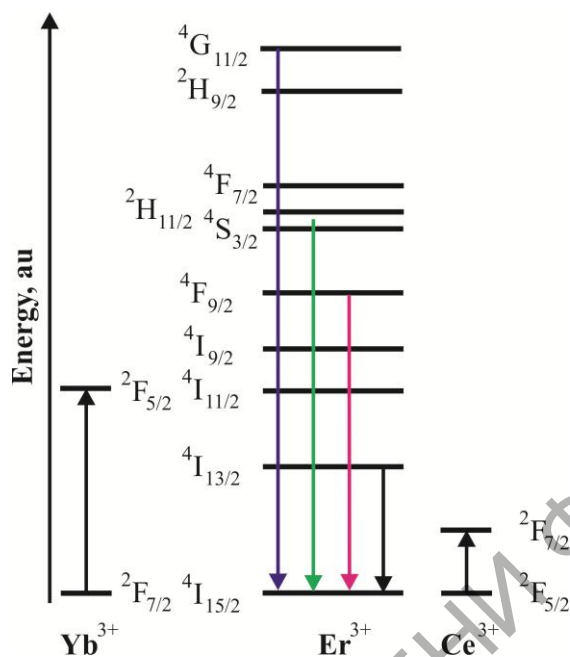


Рисунок 1 – Схема энергетических уровней ионов Yb^{3+} , Er^{3+} и Ce^{3+} .

Перенос энергии между ионами иттербия и эрбия соответствует переходам между уровнями ${}^2F_{5/2}(\text{Yb}^{3+}) + {}^4I_{15/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow {}^2F_{7/2}(\text{Yb}^{3+}) + {}^4I_{11/2}(\text{Er}^{3+})$.

Перенос энергии между ионами эрбия и церия соответствует переходам ${}^4I_{11/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^2F_{5/2}(\text{Ce}^{3+}) \rightarrow {}^4I_{13/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^2F_{7/2}(\text{Ce}^{3+})$

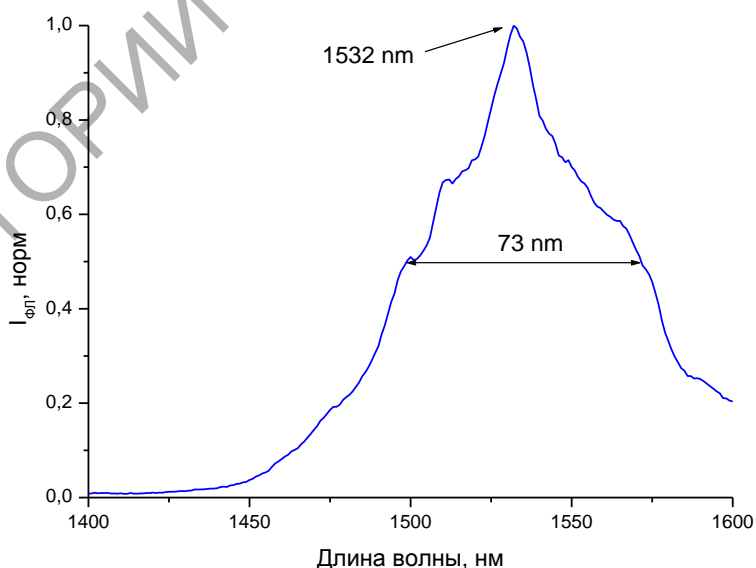


Рисунок 2 – Спектр ФЛ наночастиц $\beta\text{-NaLuF}_4/\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$ со структурой активная сердцевина – инертная оболочка в телекоммуникационном С-диапазоне при накачке излучением диодного лазера с длиной волны 977 нм

На рисунке 2 приведен спектр ФЛ нанофосфоров $\beta\text{-NaLuF}_4/\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$ в С-диапазоне при накачке лазерным излучением с длиной волны 977 нм. Видно, что нанофосфоры имеют интенсивную полосу ФЛ с центром вблизи 1532 нм, обусловленную переходами ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ в ионах Er^{3+} . Ширина спектра ФЛ по полувысоте составляет 73 нм, что потенциально позволяет усиливать оптические сигналы во всем С-диапазоне длин волн 1530–1565 нм.

Важной характеристикой нанофосфоров, определяющей их пригодность для создания полимерных волноводных усилителей, является их диспергируемость в полимерной матрице и отсутствие агломерации. Повысить диспергируемость и уменьшить агломерацию можно путем покрытия поверхности нанофосфоров специальными поверхностно-активными веществами. На рисунке 3 приведен спектр поглощения порошка синтезированных нанофосфоров $\beta\text{-NaLuF}_4/\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$, измеренный на ФТИР спектрометре. Видно, что нанофосфоры имеют полосу поглощения с центром вблизи 3430 см^{-1} , которая соответствует вибрационным колебаниям атомов в группе О-Н олеиновой кислоты, абсорбированной на поверхности наночастиц [7]. Небольшой пик поглощения вблизи 3006 см^{-1} связан с колебаниями = С-Н группы этой кислоты. Линии с центрами вблизи 2854 и 2925 см^{-1} обусловлены симметричными и асимметричными колебаниями в алифатической группе CH_2 [7]. Таким образом, подтверждено наличие олеиновой кислоты на поверхности нанофосфоров, что обуславливает их хорошее диспергирование в полимерах, в частности в SU-8.

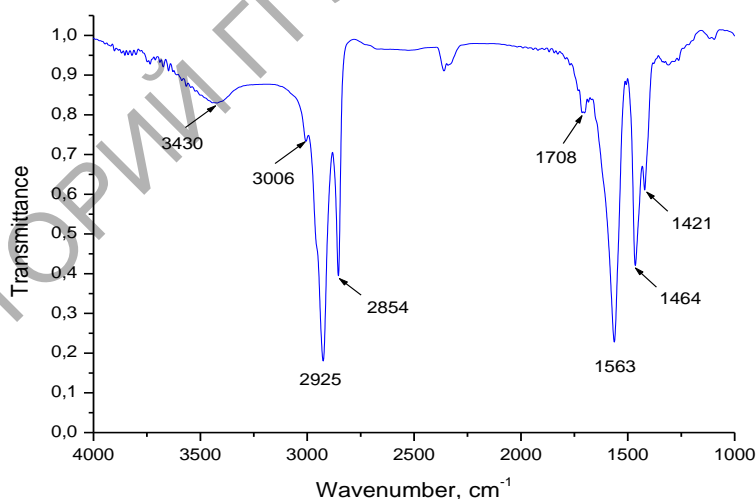


Рисунок 3 – Спектр поглощения нанофосфоров $\beta\text{-NaLuF}_4/\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$, измеренный на ФТИР спектрометре Shimadzu 8400

2. Формирование усилителя и измерение его характеристик

Для создания волноводных оптических усилителей, обладающих высоким коэффициентом усиления при длине в несколько сантиметров, необходимо

обеспечить большую концентрацию нанофосфоров в полимерной матрице. При этом, важное значение имеет также размер нанофосфоров. Действительно, по мере уменьшения диаметра наночастиц улучшается их диспергируемость в полимере, что позволяет повысить концентрацию наночастиц. С другой стороны, нанофосфоры малого размера имеют слабую ФЛ в С-диапазоне вследствие нерадиационного тушения ионов Er^{3+} , находящихся в возбужденном метастабильном состоянии $^4\text{I}_{13/2}$, из-за их взаимодействия с органическими группами С-Н и О-Н, локализованными на поверхности фосфора. Для решения этой проблемы мы использовали нанофосфоры со структурой активная сердцевина – инертная оболочка, которая защищает от тушения ФЛ органическими лигандами. Нанофосфоры растворялись в SU-8 с образованием стабильного коллоидного раствора. Раствор обрабатывался ультразвуковой пушкой и центрифугировался для повышения монодисперсности наночастиц. Волноводы формировались методом фотолитографии, в основе которого лежит реакция фотополимеризации SU-8 под действием УФ актинического излучения. На рисунке 4 дана фотография массива волноводов с внедренными нанофосфорами, изготовленных на кремниевой подложке с термически выращенным толстым (3,5 мкм) оксидным слоем. Волноводы имеют ширину 10 мкм, высоту 8 мкм, длину 15 мм.

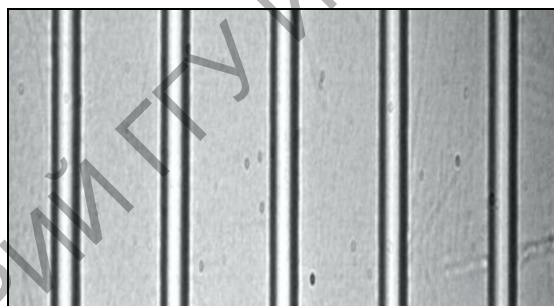


Рисунок 4 – Фотография волноводов из полимера SU-8 с нанофосфорами $\beta\text{-NaLuF}_4:\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}:\text{Ce}^{3+}$ на кремниевой подложке.

Вид сверху до закрытия волноводов полимерным покрывным слоем

Схема экспериментальной установки для измерения коэффициента усиления оптических сигналов в полимерном волноводном усилителе представлена на рисунке 5. Излучение лазера с перестраиваемой в диапазоне 1520–1560 нм длиной волны (Pure Photonics) и полупроводникового лазера накачки с длиной волны 977 нм объединяется в WDM 980/1550nm мультиплексоре и с помощью одномодового кварцевого волокна 5/125 мкм вводится в торец волновода. Выходящее из волновода излучение собирается волокном 5/125 мкм и подается на вход оптического анализатора спектра Anritsu MS9710B.

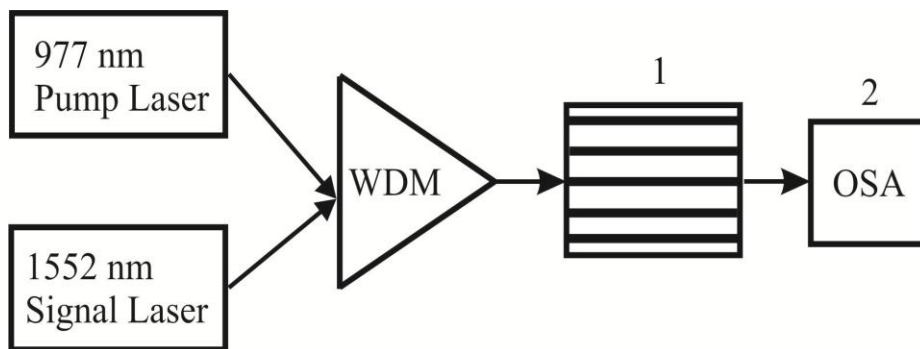


Рисунок 5 – Схема установки для измерения коэффициента усиления в волноводе. 1) Волноводы с внедренными нанофосфорами. 2) Оптический анализатор спектра (OSA)

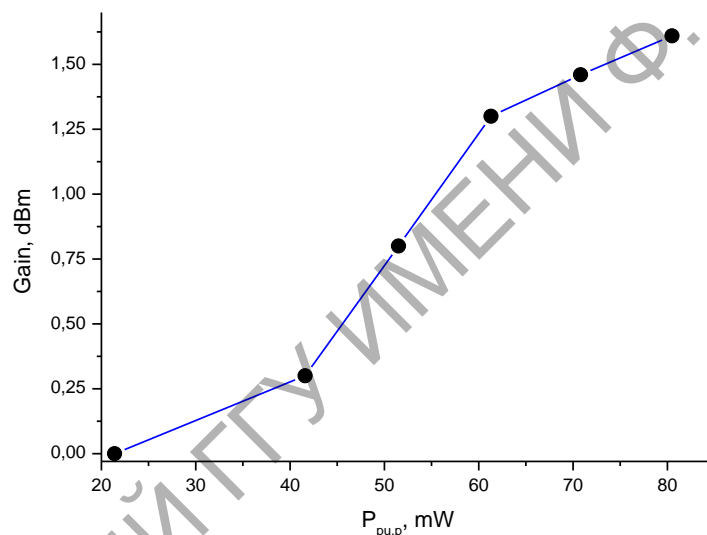


Рисунок 6 – Коэффициент усиления в полимерном волноводе с внедренными нанофосфорами $\beta\text{-NaLuF}_4:\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}:\text{Ce}^{3+}$ на длине волны 1530 нм в зависимости от мощности накачки P_{pump} излучения с длиной волны 977 нм

Усиление сигнала с длиной волны 1530 нм в волноводе рассчитывалось по формуле

$$Gain = 10 \log(P_{out} - P_{ASE}) / P_{in}, \quad (1)$$

где P_{out} – интенсивность сигнала на выходе из волновода при включенной накачке, P_{ASE} – интенсивность сигнала усиленной спонтанной эмиссии (т. е. интенсивность сигнала на длине волны 1530 нм при отсутствии усиливаемого сигнала на входе и включенной накачке), P_{in} – интенсивность сигнала на входе в волновод. На рисунке 6 представлена измеренная зависимость коэффициента усиления (1) от мощности накачки P_{pump} . Мощность усиливаемого сигнала составляла 0,5 мВт. Видно, что коэффициент усиления монотонно возрастает

при увеличении мощности накачки. Из рисунка 6 также следует, что максимальный коэффициент усиления в полимерном волноводе длиной 15 мм с внедренными нанофосфорами $\beta\text{-NaLuF}_4:\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}:\text{Ce}^{3+}$ составил 1,1 дБ/см при мощности накачки 80 мВт.

Заключение

Использование нанофосфоров, легированных редкоземельными элементами, является перспективным для формирования интегрально – оптических усилителей. Введение нанофосфоров в способные к УФ фотополимеризации композиции позволяет формировать волноводы хорошо разработанным методом контактной УФ фотолитографии. Достигнут коэффициент усиления 1,1 дБ/см при использовании нанофосфоров $\beta\text{-NaLuF}_4:\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}:\text{Ce}^{3+}$. Оценки показывают, что путем оптимизации матрицы нанофосфоров, процентного содержания редкоземельных элементов в ней, можно повысить коэффициент усиления до 15–20 дБ/см, что соответствует требованиям, предъявляемым к волноводным усилителям для С-диапазона.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-07-00759 и 16-02-00347 в части синтеза нанофосфоров, № 14-29-08265 и 16-32-00935 в части создания волноводных усилителей для С-диапазона.

Литература

1. Bradley, J.D.B. Erbium-doped integrated waveguide amplifiers and lasers / J.D.B. Bradley, M. Pollnau // *Laser & Photonics Rev.* – 2011. – Vol. 5. – P. 368.
2. A compact high-performance optical waveguide amplifier / F.D. Patel [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters.* – 2004. – Vol. 16. – P. 2607.
3. Polman, A. Broadband sensitizers for erbium-doped planar optical amplifiers: review / A. Polman, F.C.J.M. Veggel // *Opt. Soc. Am. B.* – Vol. 200421. – P. 871.
4. Rare-earth doped polymers for planar optical amplifiers / L.H. Slooff [et al.] // *J. of Applied Physics.* – 2002. – Vol. 91. – P. 3955.
5. Enhancement of 1,53 μm emission band in $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Ce}^{3+}$ nanocrystals for polymer-based optical waveguide amplifiers / X. Zhai [et al.] // *Optical Materials Express.* – 2013. – Vol. 3. – P. 270–277.
6. Optical amplification at 1525 nm in $\text{BaYF}_5: 20\% \text{Yb}^{3+}, 2\% \text{Er}^{3+}$ nanocrystals doped SU-8 polymer waveguide / P. Zhao [et al.] // *Journal of nanomaterials.* – 2014. – Vol. 2014. – Article ID 153028.
7. Feasibility study of the optical imaging of a breast cancer lesion labeled with upconversion nanoparticle biocomplexes / E.A. Grebenik [et al.] // *Journal of Biomedical Optics.* – 2013. – Vol. 18 – P. 076004.