

УДК 535

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ МЕЖДУ ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ И ЭРБИЯ В ЗАГОТОВКЕ АКТИВНОГО ВОЛОКНА*

А. С. Смирнов^{1,2}, К. П. Латкин^{1,2}, Я. Э. Садовникова^{3,4},
Е. Г. Лексина⁵, А. С. Курков^{1,2,3}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29

²Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН,
614990, г. Пермь, ул. Ленина, 13а

³Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
119991, Москва, ул. Вавилова, 38

⁴Московский государственный университет приборостроения и информатики,
107966, Москва, ул. Стромынка, 20

⁵Научно-исследовательский институт ядерной физики
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,
119234, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 5
E-mail: a.s.smrnv@gmail.com

Предложен экспресс-метод оценки коэффициента эффективности передачи энергии возбуждения между ионами иттербия и эрбия по измерению относительной интенсивности люминесценции в различных спектральных областях в заготовке активного волокна с учётом концентрации активных ионов, а также их спектроскопических констант.

Ключевые слова: эрбий, иттербий, эрбий-иттербиевые волокна, эффективность передачи энергии возбуждения.

Введение. В настоящее время активно развиваются и находят применение волоконные лазеры различных конфигураций [1–3]. Общепринятым способом повышения выходной мощности волоконных лазеров является использование накачки в оболочку активных волокон мощными многомодовыми полупроводниковыми лазерами [4]. Однако данный метод пригоден лишь для ионов, обладающих достаточно высоким сечением поглощения на длине волны накачки и соответственно малым на длине волны излучения. Такому условию не удовлетворяют, в частности, ионы эрбия. Поэтому для получения мощной генерации в области 1,55 мкм используются эрбиевые волокна, сенсibilизированные ионами иттербия [5]. Важной характеристикой таких волокон является эффективность передачи энергии возбуждения от ионов иттербия к ионам эрбия.

В данной работе предлагается метод оценки коэффициента передачи энергии возбуждения исходя из измеряемой относительной интенсивности люминесценции в различных спектральных областях в заготовке активного волокна с учётом концентрации активных ионов, а также их спектроскопических констант.

Экспериментальная установка и метод измерения. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В эксперименте люминесценция в сердцевине заготовки возбуждается через боковую поверхность излучением полупроводникового лазера мощностью

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-42-08009 р_офи_м) и АО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

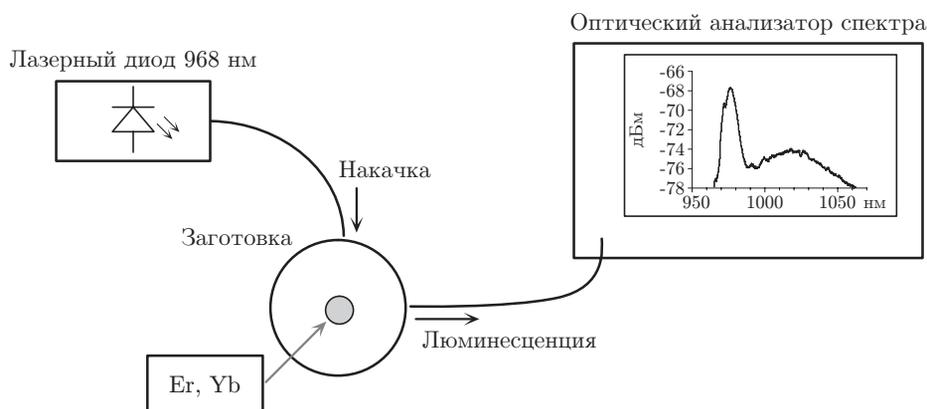


Рис. 1

до 2 Вт на длине волны 0,968 мкм. Спектр излучения лазера приведён на рис. 2. Для регистрации излучения люминесценции к боковой поверхности заготовки в направлении, перпендикулярном облучению, пристыковывался торец приёмного волокна. Выходной торец волокна присоединялся ко входу оптического анализатора спектра AQ6319 фирмы "Yokogawa". Измерение спектра люминесценции проводилось с разрешением 0,1 нм. Отметим, что выбранная геометрия возбуждения и регистрации люминесценции позволяет минимизировать долю излучения накачки, попадающую в оптический анализатор спектра. Экспериментальная установка даёт возможность проводить измерения в различных точках заготовки, что повышает точность оценки эффективности передачи энергии возбуждения.

В качестве объекта измерения была выбрана заготовка с сердцевиной на основе алюмосиликатного стекла, легированной ионами Yb и Er с концентрациями $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Известно, что такой состав не обеспечивает полной передачи энергии возбуждения [6], это удобно для оценки эффективности предложенного метода измерения. На рис. 3 представлен характерный спектр люминесценции, на котором выделяются две области люминесценции, соответствующие двум разным активным примесям: *a* — Yb, *b* — Er.

Результаты и обсуждения. На рис. 4 приведена зависимость интенсивности люминесценции на двух длинах волн от координаты вдоль заготовки. Среднее отношение интенсивности люминесценции ионов иттербия и эрбия составляет 1,58 раза (2 дБ). Для оценки эффективности передачи энергии возбуждения был произведён расчёт ожидаемого

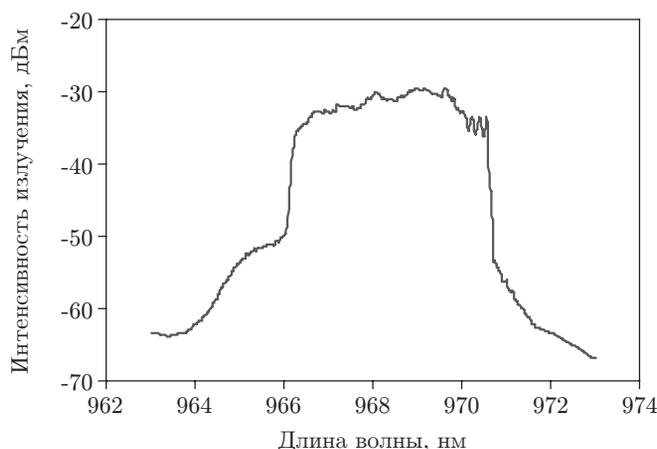


Рис. 2

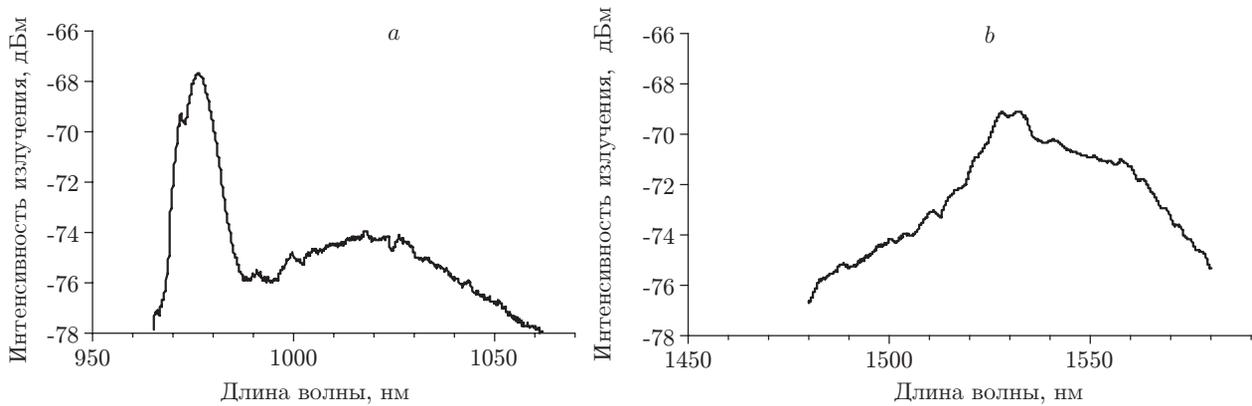


Рис. 3

отношения данных интенсивностей люминесценции в предположении отсутствия передачи энергии:

$$\frac{I^{Yb}}{I^{Er}} = \frac{\sigma_{abs}^{Yb}}{\sigma_{abs}^{Er}} \frac{N^{Yb}}{N^{Er}} \frac{\sigma_{em}^{Yb}}{\sigma_{em}^{Er}},$$

где N^{Yb} , N^{Er} — концентрации активных ионов; σ_{abs}^{Yb} , σ_{abs}^{Er} — сечения поглощения активных ионов на длине волны накачки (968 нм), равные 0,35 пм² [7] и 0,20 пм² [8]; σ_{em}^{Yb} , σ_{em}^{Er} — сечения эмиссии активных ионов на длинах волн, соответствующих максимальным значениям интенсивности эмиссии активных ионов Yb (977 нм) и Er (1530 нм), равные 2,94 пм² [7] и 0,59 пм² [8]. Отношение интенсивностей люминесценции в предположении отсутствия передачи энергии $I^{Yb}/I^{Er} = 109$.

Таким образом, практически вся люминесценция в области 1,55 мкм обусловлена передачей энергии от ионов иттербия к ионам эрбия. Коэффициент передачи η можно оценить как 0,38, исходя из соотношения интенсивностей люминесценции

$$\frac{I^{Yb}(1-\eta)}{I^{Er} + I^{Yb}\eta} = \frac{(1-\eta)I^{Yb}/I^{Er}}{1 + \eta I^{Yb}/I^{Er}} = 1,58.$$

Для проверки полученных данных была исследована лазерная генерация в волокне, вытянутом из исследованной заготовки. Лазер накачивался в оболочку полупроводниковым

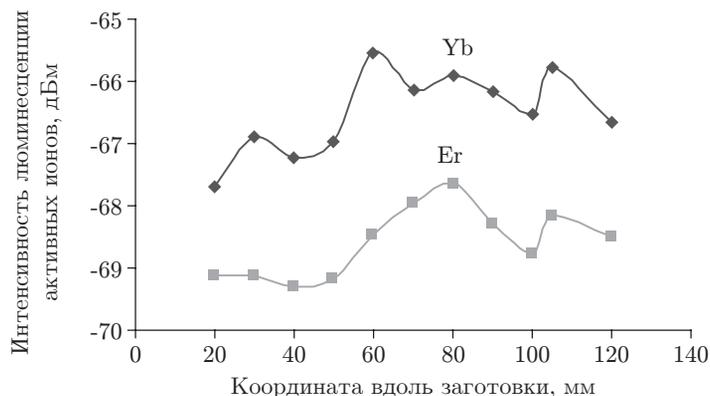


Рис. 4

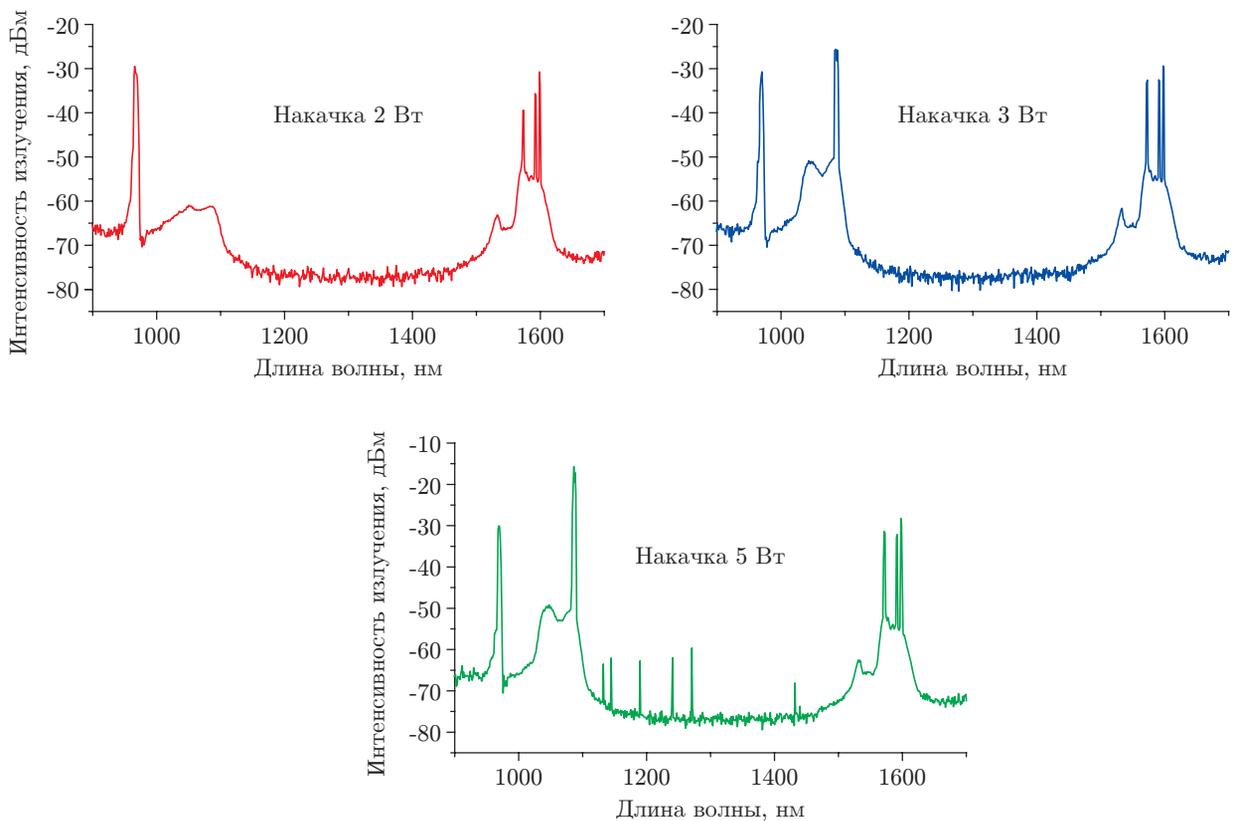


Рис. 5

лазером на длине волны 0,98 мкм, селективные отражатели в резонаторе отсутствовали. На рис. 5 представлен спектр генерации лазера при различных интенсивностях накачки. Из рисунка видно, что генерация осуществляется на двух длинах волн, это подтверждает наличие передачи части энергии возбуждения от ионов иттербия к ионам эрбия.

В качестве дополнительной проверки метода было проведено измерение спектра люминесценции в образце фосфатного стекла, легированного той же комбинацией активных ионов с концентрациями Er 10^{20} см $^{-3}$ и Yb $1,7 \cdot 10^{21}$ см $^{-3}$. Как и следовало ожидать, в спектре люминесценции (рис. 6) присутствует только полоса, связанная с ионами эрбия, что соответствует практически полной передаче энергии возбуждения.

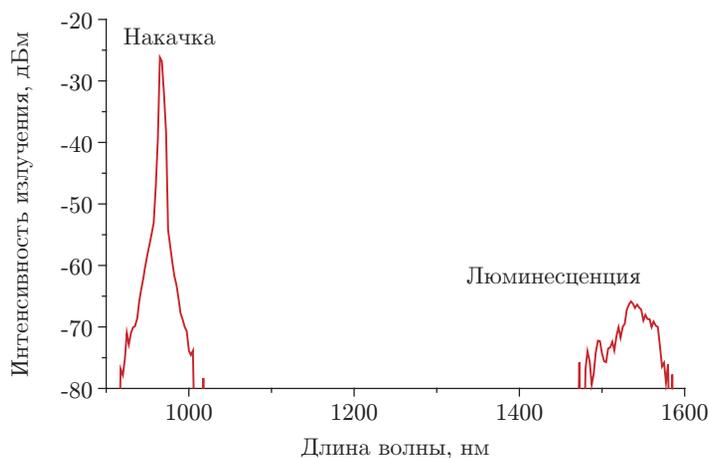


Рис. 6

Заключение. В предлагаемой работе продемонстрирован метод, дающий возможность оценить коэффициент эффективности передачи энергии возбуждения между ионами иттербия и эрбия в заготовке активного волокна по измерению относительной интенсивности люминесценции в различных спектральных областях с учётом концентрации активных ионов, а также их спектроскопических констант, что позволяет производить отбраковку изделия на стадии заготовки. Метод также может быть применён при освоении технологии производства волоконных заготовок с другими активными элементами для оценки эффективности передачи энергии возбуждения между ними.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курков А. С., Дианов Е. М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. 2004. **34**, № 10. С. 881–900.
2. Бабин С. А., Ватник И. Д. Волоконные лазеры со случайной распределённой обратной связью на рэлеевском рассеянии // Автометрия. 2013. **49**, № 4. С. 3–29.
3. Злобина Е. А., Каблуков С. И. Оптические параметрические генераторы на основе волоконных световодов // Автометрия. 2013. **49**, № 4. С. 53–78.
4. Garontsev V. P., Samartsev I. E., Zayats A. A., Loryan R. R. Laser-diode pumped Yb-doped single mode tunable fibre lasers // Proc. Conf. Advanced Solid State Lasers. Hilton Head, USA, 1991. Paper WC1-1. P. 214–216.
5. Townsend J. E., Barnes W. L., Jedrzejewski K. P., Grubb S. G. Yb³⁺ sensitised Er³⁺ doped silica optical fiber with ultra high transfer efficiency and gain // Electron. Lett. 1991. **27**, N 21. P. 1958–1959.
6. Vienne G. G., Brocklesby W. S., Brown R. S. et al. Role of aluminum in ytterbium–erbium codoped phosphoaluminosilicate optical fibers // Opt. Fiber Technol. 1996. **2**, N 4. P. 387–393.
7. Kurkov A. S. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers // Laser Phys. Lett. 2007. **4**, N 2. P. 93–102.
8. Desurvire E. Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Principles and Applications. N. Y.: Wiley-Interscience, 2002. 770 p.

Поступила в редакцию 8 декабря 2014 г.