

Теоретический расчет спектров усиленной спонтанной люминесценции иттербиевого волокна

А. И. ТРИКШЕВ^{1,2,*}, В. Б. ЦВЕТКОВ^{1,3}

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

²Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

*Контактный e-mail: trikshev@gmail.com

Приведен численный расчет спектров усиленной спонтанной люминесценции активного иттербиевого волокна при длинах волн накачки на 915 и 975 нм. Получено качественное соответствие с экспериментальными спектрами.

Ключевые слова: усиленная спонтанная люминесценция, иттербиевое волокно.

Введение

Одна из современных тенденций развития волоконных лазеров — увеличение выходной мощности излучения. Основным методом создания мощных волоконных лазеров считается использование схемы задающий генератор/волоконный усилитель [1, 2]. Важной задачей при разработке волоконного усилителя, при наличии готового активного волокна, является определение оптимальной длины волокна.

В данной работе рассмотрен метод определения оптимальной длины активного волокна по интенсивности спектра усиленной спонтанной люминесценции (УСЛ) на длине волны сигнала. Представлены расчеты спектров УСЛ для волокна с многоэлементной оболочкой (GTWave) [3], легированного ионами иттербия, при различных длинах волны накачки. Также проведено сравнение численного расчета с экспериментальными данными.

1. Система скоростных уравнений

Усиление света в иттербиевом усилителе происходит благодаря переходу между уровнями $2F_{5/2}$ и $2F_{7/2}$. Поэтому в спектре поглощения волоконных световодов, легированных ионами иттербия, присутствует лишь одна полоса поглощения с двумя максимумами на 915 и 976 нм. Спектр люминесценции, обусловленный данным переходом, имеет максимумы в области 980 и 1035 нм. Время жизни на метастабильном уровне для алюмосиликатного стекла составляет $t = 0.8$ мс. Численное решение задачи нахождения спектров УСЛ проводилось на основе модели волоконного усилителя, легированного ионами эрбия [4–6]. Скоростное уравнение для заселенности верхнего уровня можно записать следующим образом:

$$\frac{dn_2}{dt} = (R_{12} + W_{12})n_1 - (R_{21} + W_{21} + A)n_2.$$

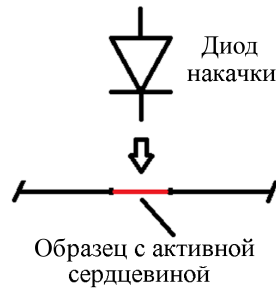


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для получения спектра спонтанной люминесценции

Здесь $N = n_1 + n_2$ — концентрация активной примеси в сердцеvine волокна; n_1, n_2 — населенность нижнего и верхнего уровней соответственно.

Скорости индуцированных переходов, обусловленных накачкой, определяются как

$$R_{12} = \frac{\sigma_{ap} I_p}{h\nu_p} = \frac{\sigma_{ap} P_p}{h\nu_p S_{cl}}, \quad R_{21} = \frac{\sigma_{ep} I_p}{h\nu_p} = \frac{\sigma_{ep} P_p}{h\nu_p S_{cl}}, \quad (1)$$

где I_p, P_p — интенсивность и мощность накачки; S_{cl} — площадь сечения оболочки волокна; σ_{ap}, σ_{ep} — сечение поглощения и сечение люминесценции на длине волны накачки соответственно [7]. Сечения люминесценции экспериментально получены при накачке активного волокна на длинах волн 915 и 975 нм.

Для получения сечения люминесценции измерены спектры выходного излучения при боковой накачке сердцеvine активного волокна. Образец волокна длиной 1 мм вваривался между двумя волокнами SMF-28 со скошенными торцами. Схема установки показана на рис. 1. Сечения поглощения и люминесценции волокна показаны на рис. 2.

Скорость индуцированных переходов, обусловленных прохождением сигнала и усиленной спонтанной люминесценцией, определяется как

$$W_{12} = W_{12s} + W_{12L}, \quad W_{21} = W_{21s} + W_{21L},$$

$$W_{12s} = \frac{\sigma_{as} I_s}{h\nu_s} = \chi \frac{\sigma_{as} P_s}{h\nu_s S_{cr}}, \quad W_{12L} = \frac{\sigma_{aL} I_L}{h\nu_L} = \chi \frac{\sigma_{aL} P_L}{h\nu_L S_{cr}},$$

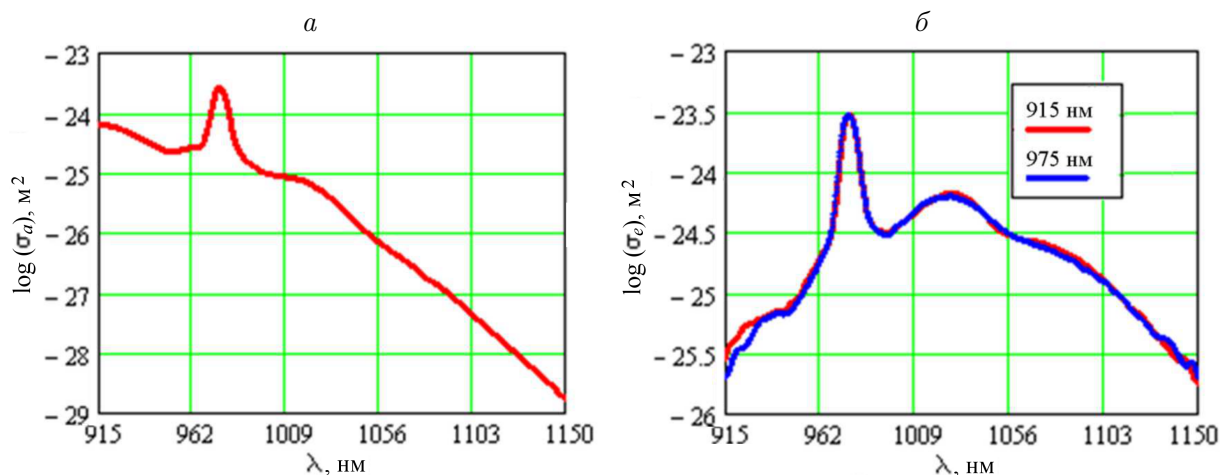


Рис. 2. Сечение поглощения (а) и люминесценции (б) активного волокна

$$W_{21s} = \frac{\sigma_{es} I_s}{h\nu_s} = \chi \frac{\sigma_{es} P_s}{h\nu_s S_{cr}}, \quad W_{21L} = \frac{\sigma_{eL} I_L}{h\nu_L} = \chi \frac{\sigma_{eL} P_L}{h\nu_L S_{cr}}. \quad (2)$$

Здесь I_s, P_s — интенсивность и мощность сигнала; I_L, P_L — интенсивность и мощность на длинах волн спонтанной люминесценции; S_{cr} — площадь сечения сердцевины волокна; χ — коэффициент перекрытия моды сигнала активной сердцевины, который рассчитывался как отношение энергии волны основного сигнала, распространяющегося в активной сердцевине, к полной энергии сигнала в основной моде (для одномодового волокна $\chi = 0.6$). Скорость спонтанного перехода определяется как $A = 1/\tau$.

Для стационарного случая ($dn/dt = 0$)

$$n_2 = N \frac{R_{12} + W_{12}}{R_{12} + R_{21} + W_{12} + W_{21} + A}. \quad (3)$$

Распределение накачки, сигнала и спонтанной люминесценции вдоль активного световода описывается дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dP_s}{dz} &= \chi(n_2\sigma_{es} - n_1\sigma_{as})P_s - \alpha_s P_s, \\ \frac{dP_p}{dz} &= k(n_2\sigma_{ep} - n_1\sigma_{ap})P_p - \alpha_p P_p, \\ \frac{dP_L}{dz} &= \chi n_2\sigma_{eL}(P_L + 2h\nu_L\Delta\nu_L) - \chi n_1\sigma_{aL}P_L - \alpha P_L, \end{aligned} \quad (4)$$

где k — коэффициент перекрытия мод накачки и активной сердцевины; $\alpha_s, \alpha_p, \alpha$ — коэффициенты “серых” потерь на длинах волн сигнала, накачки и люминесценции соответственно (характерные значения 0.1–0.2 дБ/м); $P_{L0} = h\nu_L\Delta\nu_L$ — мощность спонтанной люминесценции, определяемая одним шумовым фотоном в полосе длин волн $\Delta\nu_L$ (умножение на 2 учитывает два ортогональных состояния поляризации).

2. Решение и сравнение с экспериментальными результатами

Решение системы уравнений (1)–(4) проводилось методом Рунге—Кутты четвертого порядка. Мощность накачки $P_{p0} = 4$ Вт. Начальная мощность сигнала $P_{s0} = 0$ (поскольку расчет производился для спектра УСЛ в отсутствие внешнего сигнала). Начальная мощность спонтанной люминесценции $P_{L0} = 0$. Для получения спектра УСЛ, а не единичного значения величины P_L расчет производился одновременно для нескольких длин волн ν_L в диапазоне от 910 до 1150 нм с шагом 0.5 нм. Соответственно, для каждой длины волны ν_L рассчитывались значения σ_{eL} и σ_{aL} согласно графикам на рис. 2. Поэтому результатом расчета являлось спектральное распределение средней мощности УСЛ вдоль активного волокна. Параметры исследуемого активного волокна: диаметр сердцевины 6 мкм, диаметр оболочки 125 мкм, концентрация активной примеси

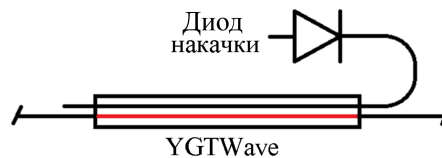


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

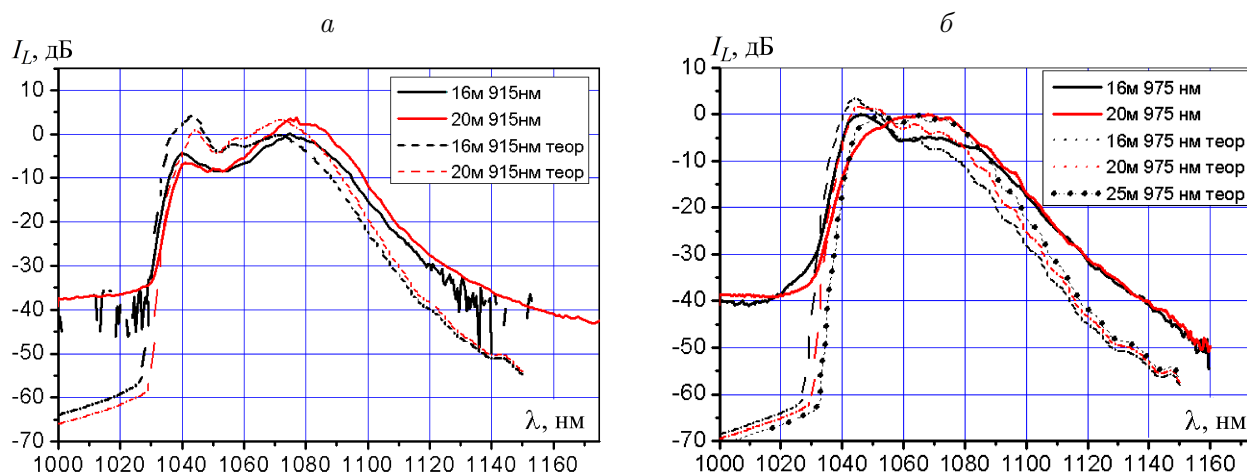


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические спектры усиленной спонтанной люминесценции при накачке на 915 нм (а) и 975 нм (б)

$N = 8.5 \cdot 10^{25} \text{ м}^3$, $k = S_{cr}/(2S_{cl}) = 1.15 \cdot 10^{-3}$. Исследование проводилось для длин волн накачки 915 и 975 нм и длин активного волокна 16 и 20 м. Для экспериментального определения спектральных характеристик активного волокна была собрана установка, схема которой показана на рис. 3. Выходное излучение измерялось на выходе одного из торцов, сколотых под углом 8 град.

Спектры УСЛ при накачке на длинах волн 915 и 975 нм, полученные экспериментально и теоретически, показаны на рис. 4. Диапазон по уровню -30 дБ для теоретически рассчитанных спектров составил 1030–1110 нм. Для спектров, полученных экспериментально, диапазон составил 1030–1125 нм. Видно, что с увеличением длины активного волокна спектры смещаются в сторону длинных волн, а уровень УСЛ растет в диапазоне от 1060 нм, что согласуется с экспериментальными данными. Для спектров УСЛ при накачке на длине волны 915 нм положения главных максимумов экспериментальных спектров 1040 и 1076 нм соответствуют расчетным максимумам в 1044 и 1072 нм. При расчете спектра УСЛ для длины волны накачки на 975 нм и длине активного волокна 16 м главный спектральный максимум 1045 нм соответствует экспериментальным данным. Однако максимум на 1066 нм, полученный в эксперименте (при накачке на 975 нм и длине активного волокна 20 м), соответствует максимуму теоретического спектра при длине активного волокна 25 м. Это может быть связано с тем, что в работе используется простая модель, которая не учитывает сложную геометрию многоэлементного GTWave-волокна. Из этого можно сделать предварительную оценку, что более оптимальная длина активного волокна для усиления сигнала в диапазоне длин волн более 1060 нм составляет 20 м.

Для проверки усилительных свойств волокна использовался задающий генератор на основе полупроводникового лазерного диода мощностью 10 мВт с длиной волны генерации 1062 нм. В случае накачки на длине волны 915 нм установлено, что при длине активного волокна 16 м усиление составило 18.7 дБ, а при длине 20 м — 20.8 дБ. При накачке на 975 нм усиление равно 21.8 и 23.5 дБ для длин активного волокна 16 и 20 м соответственно. Теоретические данные качественно согласуются с данными, полученными экспериментально. Действительно, при увеличении длины активного волокна с 16 до 20 м уровень УСЛ на 1062 нм растет при накачке как на 915 нм, так и на 975 нм. Таким образом, длина активного волокна 20 м была более оптимальной, чем 16 м.

Заключение

Приведен численный расчет спектров усиленной спонтанной люминесценции активного иттербиевого волокна при длине волн накачки 915 и 975 нм. Получено хорошее соответствие с экспериментальными данными как по спектральному диапазону УСЛ, так и по положению основных максимумов. Поведение теоретических спектров УСЛ с увеличением длины активного волокна также согласовалось с экспериментальными результатами. На примере усиления сигнала на длине волны 1062 нм показано, что оно растет с увеличением длины активного волокна с 16 до 20 м, как и было теоретически предсказано.

Список литературы / References

- [1] Dong, X., Xiao, H., Zhou, P., Wang, X., Ma, Y., Leng, J., Xu, X., Liu, Z. 20 kHz linewidth all fiber single-frequency MOPA laser // Laser Physics. 2011. Vol. 21. P. 1108.
- [2] Chi Liu, Yunfeng Qi, Yaqian Ding, Jun Zhou, Jingxing Dong, Yunrong Wei, Qihong Lou. All-fiber, high power single-frequency linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier // Chinese Optics Lett. 2011. Vol. 9, No. 3. P. 031402.
- [3] Grudinin, A.B., Payne, D., Turner, P.W., Zervas, M.N., Ibsen, M., Durkin, M.K. An optical fiber arrangement // Intern. Patent WO. 1999. 00/67350.
- [4] Pedersen, B., Bjarklev, A., Povlsen, J.H., Dybdal, K., Larsen, C.C. The design of erbium-doped fiber amplifiers // J. Lightwave Technol. 1991. Vol. 9, No. 9. P. 1105–1112.
- [5] Giles, C.R., Desurvire, E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers // J. Lightwave Technol. 1991. Vol. 9, No. 2. P. 271–283.
- [6] Barnard, C., Myslinski, P., Chrostowski, J., Kavehrad, M. Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1994. Vol. 30, No. 8. P. 1817–1829.
- [7] Kurkov, A.S. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers // Laser Phys. Lett. 2007. Vol. 4, No. 2. P. 93–102.

Поступила в редакцию 10 ноября 2017 г.

Theoretical amplified spontaneous emission calculation of ytterbium doped fiber

TRIKSHEV, ANTON I.^{1,2,*}, TSVETKOV, VLADIMIR B.^{1,3}

¹General Physics Institute RAS, Moscow, 119991, Russia

²Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, 432017, Russia

³National Research Nuclear University MIPhi, Moscow, 115409, Russia

*Corresponding author: Trikshev, Anton I., e-mail: trikshev@gmail.com

This work addresses the following goals and objectives: 1) theoretical calculation of the spectrum of amplified spontaneous emission (ASE) for the active ytterbium fiber at different pump wavelengths and different lengths of the active fiber; 2) experimental

determination of the ASE and comparison with the theoretical spectrum; 3) finding of the optimal length of active fiber from the intensity of the amplified spontaneous emission spectrum at the signal wavelength; 4) experimental verification of the results.

The numerical solution of the systems of velocity equations by the fourth-order Runge—Kutta method is given in the paper. The calculation was based on a two-level model of the fiber amplifier. The calculation was performed simultaneously for several wavelengths of ASE in the range from 910 to 1150 nm in 0.5 nm steps. Parameters of the active fiber under study are the following: core diameter is 6 μm , clad diameter is 125 μm , doping concentrations in active core is $N = 8.5 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$. The study was carried out for the 915 and 975 nm pump wavelengths, and active fiber lengths of 16 and 20 m.

The spectra of ASE were obtained as a result of the calculation. These spectra were well matched with the experimentally spectra, both from the spectral range of the ASE, either from the position of the main maxima. Also, the change of the shape of the theoretical ASE spectra with increasing length of the active fiber, was consistent with the experimental results. It was shown that the gain increases as the length of the active fiber changes from 16 to 20 m for the amplification at 1062 nm, as predicted theoretically.

Keywords: amplified spontaneous emission, ytterbium doped fiber.

Received 10 November 2017