

# Теоретический анализ периодического усиления сигнала в волоконных лазерах

**О.В. Штырина<sup>\*</sup>, И.А. Яруткина, А.С. Скидин, М.П. Федорук**

Новосибирский государственный университет

<sup>\*</sup>E-mail: [olya.shtyrina@gmail.com](mailto:olya.shtyrina@gmail.com)

DOI: 10.31868/RFL2020.177-178

В волоконных лазерах с распределенным усилением высокая энергия выходных импульсов достигается за счет многократного усиления сигнала в результате его последовательного распространения по ячейкам активного волокна внутри резонатора [1]. Лазеры с применением техники разгрузки резонатора являются примером таких систем. Однако для достижения желаемой энергии и мощности импульса необходимо оптимизировать параметры лазера, а также конфигурацию резонатора [2]. Поскольку число свободных параметров лазера растет с ростом числа усилительных ячеек, оптимизация таких систем требует больших вычислительных ресурсов. В связи с этим разработка новых эффективных теоретических аппроксимаций позволяет предсказывать оптимальные значения некоторых параметров лазерных систем.

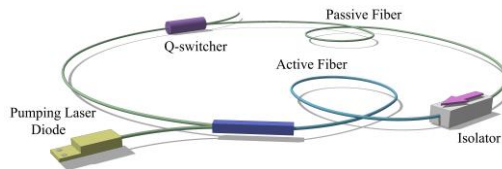


Рис. 1. Схема волоконного лазера с распределенным усилением.

Будем рассматривать резонатор с распределенным усилением как кольцевой резонатор с  $n$  обходами активного волокна в течение времени обхода резонатора  $T_R$  и с мультипликативными потерями (см. рис.1). В этом предположении динамика средней мощности зависит только от коэффициентов усиления  $G_i$  ( $1 < G_i < \exp(g - \alpha)L_i$ ) и коэффициентов потерь  $R_i$  ( $R_1 = \dots = R_{n-1} \neq R_n = R_{out} < 1$ ). Здесь  $i$  – число секций активного волокна,  $L_i$  – длина  $i$ -й секции активного волокна,  $\alpha$  – линейные потери,  $g$  – коэффициент усиления малого сигнала. Тогда, общее усиление равно  $G_{total} = \prod G_i = 1 / \prod R_i$ . Для изучения динамики медленно меняющейся огибающей в волокне было использовано неконсервативное нелинейное уравнение Шредингера (см., например, [3]).

С целью нахождения распределения усиления вдоль лазерного резонатора будем использовать общий итерационный метод. Здесь набор коэффициентов  $\{G_i^0 = (q)^i / R_{n-1}; q = R_{out}^{-\frac{n(n+1)}{2}}, 1 \leq i \leq n\}$ . Верхний индекс для  $G^j$  и  $P^j$  соответствует номеру итерации. Таким образом, получаем следующий итерационный процесс:

$$\left\{ P_i(0)^j = P_{sat} \left( \frac{g}{\alpha} - 1 \right) \left( C - (G_i^j)^{\alpha/g} \right) / \left( G_i^j C - (G_i^j)^{\alpha/g} \right) \right\}:$$

$$\text{если } (P_i(0)^j G_i^j R_i < P_{i+1}(0)^j) \& (P_{i-1}(0)^j G_{i-1}^j R_{i-1} > P_i(0)^j) \Rightarrow G_i^j \text{ переоценено, } G_i^{j+1} = G_i^j / (1 + \varepsilon_i)$$

$$\text{если } (P_i(0)^j G_i^j R_i > P_{i+1}(0)^j) \& (P_{i-1}(0)^j G_{i-1}^j R_{i-1} < P_i(0)^j) \Rightarrow G_i^j \text{ недооценено, } G_i^{j+1} = G_i^j \times (1 + \varepsilon_i)$$

$$\text{иначе } \Rightarrow G_i^{j+1} = G_i^j; 1 \leq i \leq n.$$

Для данного итерационного процесса был использован следующий критерий сходимости:  $\max_{1 \leq i \leq n} |P_i(0)^j G_i^j R_i - P_{i+1}(0)^j| / P_{i+1}(0)^j < \varepsilon_2$ , где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  принимают малые predetermined значения.

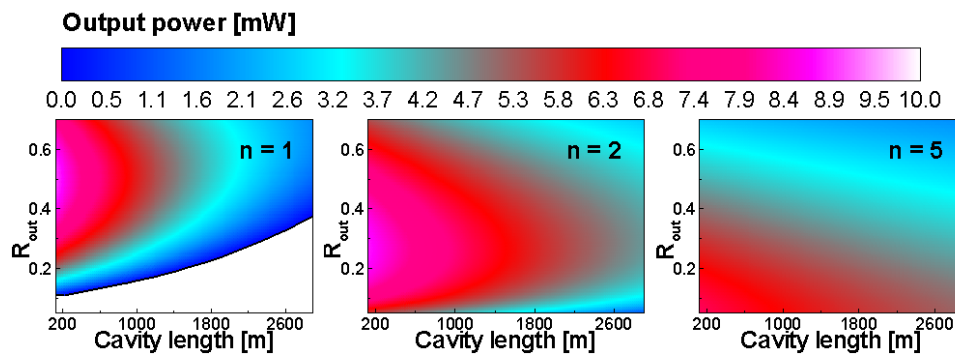


Рис. 2. Линии уровня выходной мощности в плоскости (длина резонатора,  $R_{out}$ ) для различного числа секций активного волокна ( $n$ ).

Будем рассматривать эффективность усиления как отношение полученной выходной энергии к мощности накачки, необходимой для ее достижения. В этих терминах использование техники разгрузки резонатора позволяет повысить эффективность усиления. Увеличение выходной энергии происходит за счет практически неограниченной возможности компенсировать потери на модуляторе добротности. В системах с распределенным усилением баланс между усилением и потерями достигается при значительно больших средних мощностях за счет отсутствия потерь на ответвителе в установившемся режиме при обходе по внутренней петле, что позволяет уменьшить величину общих потерь. Так, например, (см. рис. 2), при одинаковой частоте повторения в кольцевом волоконном лазере с длиной резонатора 2 км ( $n=1$ ) и волоконном лазере на основе техники разгрузки резонатора с пятью периодическими волоконными секциями ( $n=5$ ) по 400 м, выходная энергия во втором случае будет больше при меньших мощностях накачки и более широкой области устойчивой импульсной генерации.

Таким образом, системы с разгрузкой резонатора могут эффективно использоваться не только для активной синхронизации мод, но также для усиления сигнала. Достоинства таких систем связаны с их потенциальной возможностью компенсировать практически неограниченные потери на ответвителе, где уже при небольших значениях  $n$  выходная энергия зависит от потерь между двумя последними активными элементами. При этом увеличение числа обходов периодических секций приводит к синхронизации мод, но негативно сказывается на выходной мощности сигнала.

Работа была выполнена при поддержке проекта РФФ №20-11-20040.

## Литература

- [1] A. Ivanenko, S. Kobtsev, et al. *Opt. Express* **24**, 6650-6655 (2016)
- [2] O. V. Shtyrina, I.A. Yarutkina, et al. *IEEE Photonics J.* **7**, 1-7 (2015)
- [3] B.G. Bale, O.G. Okhotnikov, S.K. Turitsyn, "Modeling and Technologies of Ultrafast Fiber Lasers," in *Fiber Lasers* (Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH Co., 2012)