

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ\*

✉ Д. А. Художиткова, А. Е. Беднякова

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

✉ khudozhitkova.da@gmail.com

Гибридный волоконный лазер на основе полупроводникового оптического усилителя (ПОУ) является интересным и перспективным объектом исследования. В таких лазерах возможна перестройка центральной длины волны излучения благодаря взаимодействию нелинейных эффектов в оптоволокне и в ПОУ [1, 2]. В данной работе выполнено численное и аналитическое исследование волоконного лазера с использованием ПОУ в качестве усиливающей среды.

В результате численного моделирования построены области существования устойчивой генерации лазера. Продемонстрирована нетривиальная внутривибраторная динамика: при распространении в волоконных световодах импульс изменяет не только длительность, но и скорость (рис. 1). Определены параметры системы, оказывающие влияние на центральную длину волны излучения. Показано, что величина спектрального сдвига зависит от кумулятивной дисперсии резонатора и ширины полосы пропускания спектрального фильтра. Был предложен эффективный способ управления центральной частотой сигнала — изменение тока инжекции в ПОУ (рис. 2).

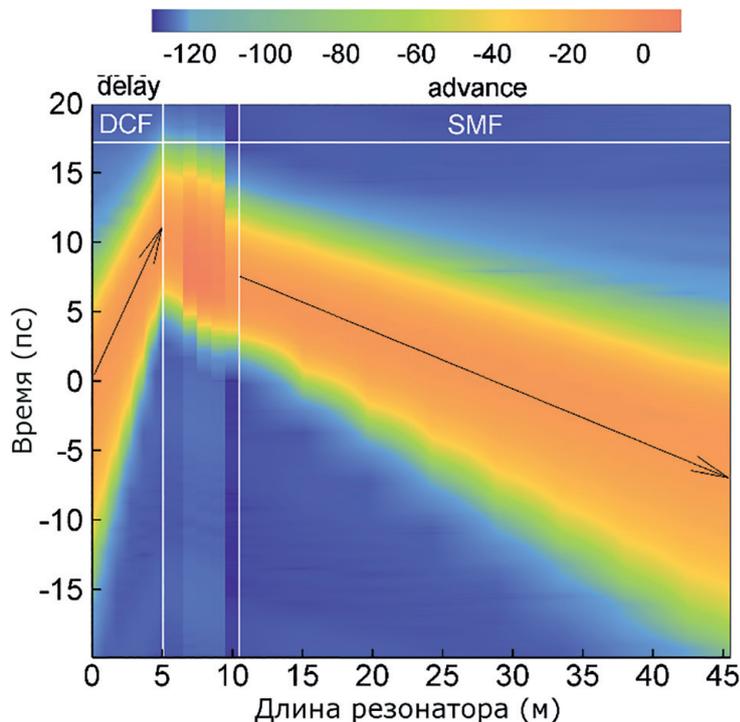


Рис. 1. Эволюция импульса на одном обходе резонатора

\* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-00314).

© Д. А. Художиткова, А. Е. Беднякова, 2024

Так как волоконный лазер является сложной многопараметрической системой, выполнение численного моделирования как последовательного прохождения поля через каждый элемент резонатора требует больших временных затрат. При малых изменениях оптического поля вдоль резонатора лазер можно описать с помощью распределенного уравнения. Для исследуемого лазера такая модель получена в работе [3]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{i\sigma_b}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - i|u|^2 u = \delta u + \eta \left( \frac{\partial}{\partial \tau} + i\Omega_f \right)^2 u - \rho(1 - i\alpha_H) u \int_{-\infty}^{\tau} |u(\tau')|^2 d\tau',$$

где  $u$  — нормированная амплитуда,  $z$  — эволюционная переменная,  $\tau$  — нормированное время,  $\delta$  — разность между линейным усилением и линейными потерями,  $\eta$  — ширина спектрального фильтра,  $\Omega_f$  — максимум пропускания спектрального фильтра,  $\rho$  — коэффициент насыщения усиления,  $\alpha_H$  — фактор Генри. Параметры  $\delta$ ,  $\eta$  и  $\rho$  варьировались в широком диапазоне значений.

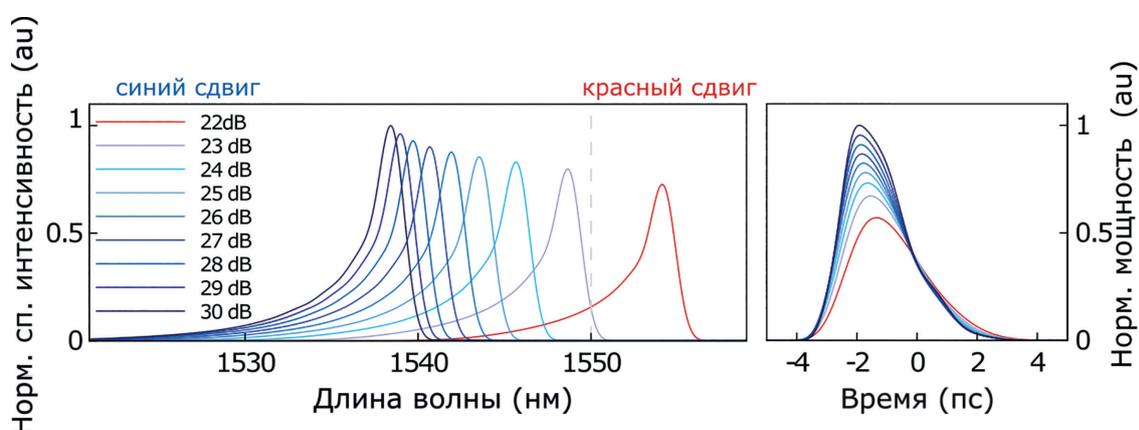


Рис. 2. Спектральные (слева) и временные (справа) профили в зависимости от коэффициента усиления малого сигнала (тока инжекции) при кумулятивной дисперсии  $\beta_2^{\text{cum}} = -0,18 \text{ пс}^2$  и ширине спектрального фильтра 40 нм

В этой работе определены границы применимости данной модели в пространстве параметров  $\delta$ ,  $\eta$  и  $\rho$ . Также проведено исследование устойчивости аналитических решений в виде чирпованного и нечирпованного солитонов.

Для более точного описания гибридного волоконного лазера на основе ПОУ были построены несколько модификаций распределенной модели. Для этих уравнений выписаны аналитические решения, получены аналитические выражения для основных характеристик излучения и ограничения на области существования этих решений.

### Литература

1. Bednyakova A. E., Khudozhitkova D., Kokhanovskiy A., Turitsyn S. K. Nonlinear spectral blueshift in semiconductor optical amplifiers // Opt. Lett. 2021. Vol. 46. P. 4757–4760.
2. Bednyakova A., Khudozhitkova D., Turitsyn S. Nonlinear spectral tunability of pulsed fiber laser with semiconductor optical amplifier // Sci Rep. 2022. Vol. 12. P. 13799.
3. Turitsyn S. K. Soliton control in fiber lasers with a semiconductor optical amplifier by off-set filtering // Opt. Lett. 2023. Vol. 48. P. 3351–3354.