

Тема: Исследование гибридных волоконных лазеров с полупроводниковым оптическим усилителем.

Состав коллектива:

Художиткова Дарья Алексеевна, НГУ, младший научный сотрудник, Лаборатория технологий фотоники и машинного обучения для сенсорных систем ФФ.

Беднякова Анастасия Евгеньевна, НГУ, старший научный сотрудник, Лаборатория технологий фотоники и машинного обучения для сенсорных систем ФФ.

Аннотация.

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 распределенной модели волоконного лазера с использованием ПОУ в качестве усиливающей среды.

О работе.

Постановка задачи.

Численное исследование распределенных моделей гибридных волоконных лазеров на основе полупроводникового оптического усилителя. Определение областей применимости распределенной модели. Проверка устойчивости аналитических и приближенных аналитических решений для распределенного уравнения. Схема лазера представлена на рисунке 1 и включает в себя полупроводниковый оптический усилитель (SOA), спектральный фильтр, выходной ответвитель, насыщающийся поглотитель и оптические волокна.

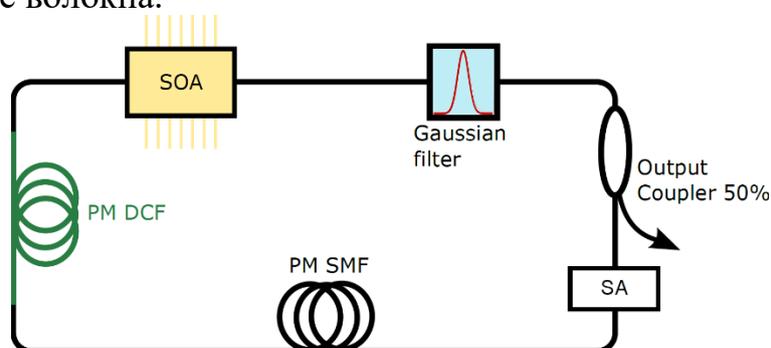


Рисунок 1. Схема лазера.

Современное состояние проблемы (на момент начала работы)

Численное моделирование последовательного прохождения поля через каждый элемент внутри резонатора позволяет точнее описать эволюцию импульса, однако из-за нелинейного характера динамики излучения такой подход требует больших временных затрат, особенно в многопараметрических системах. Также он не позволяет осуществить поиск аналитических решений. При малых изменениях характеристик излучения вдоль резонатора моделирование лазера можно выполнять с помощью распределенной модели. Для исследуемого лазера такая модель получена в работе [1]:

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

здесь u – нормированная амплитуда, z – эволюционная переменная, τ – нормированное время, δ – разность между линейным усилением и линейными потерями, η – ширина спектрального фильтра, Ω_f – максимум пропускания спектрального фильтра, ρ – коэффициент насыщения усиления, α_H – фактор Генри. Параметры δ , η и ρ варьировались в широком диапазоне значений.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

В работе [3] для уравнения (1) определены аналитические решения в форме нечирпованного и чирпованного солитонов:

$$u_{un} = A(Z) \operatorname{sech}(A(Z)(\tau - T)) \exp(-i\Omega(\tau - T) + i\phi) \quad (2)$$

$$u_{ch} = \frac{A_0}{\cosh^{1+iq} \left(\frac{\tau - \sigma Z}{T_0} \right)} \exp(-i\omega_0 + ikZ) \quad (3)$$

Уравнение (1) решалось численно методом расщепления по физическим процессам с применением быстрого преобразования Фурье на линейном шаге, нелинейный шаг вычислялся методом Рунге-Кутты второго порядка.

В качестве начального распределения поля взяты солитоны (2) и (3).

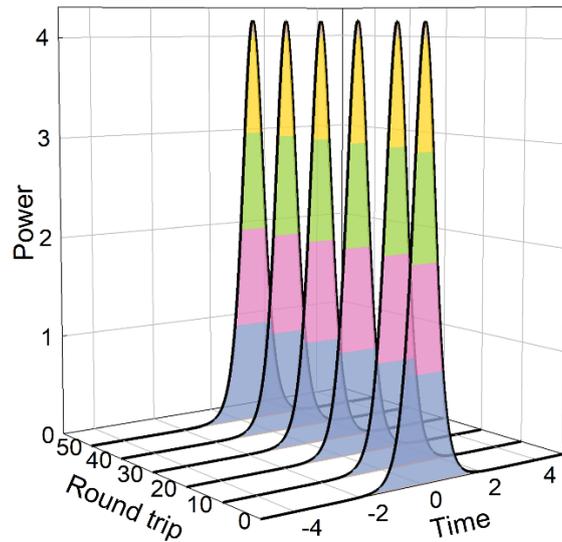


Рисунок 2. Распространение нечирпованного солитона.

Показано, что решение в виде нечирпованного солитона (2) устойчиво при малых значениях $\delta < 10^{-2}$, $\eta < 10^{-2}$ и $\rho < 10^{-3}$. Решение в форме (3) неустойчиво во всей области существования решений, определенной в работе [3]. На рисунке 3 показана характерная эволюция аналитического решения при вычислении распространения распределенным уравнением. Наблюдается рост предимпульса, который в дальнейшем превращается в несимметричный импульс. На рисунке 4 показан рост ошибки в зависимости от номера обхода резонатора, явно выделяется область с формированием предимпульса, где ошибка мало меняется, и область, где происходит перестроение симметричного солитона в несимметричный импульс. Отмечу, что при моделировании данного лазера дискретной моделью устойчивое решение также принимало несимметричный вид, что говорит о хорошем согласии распределенной модели с дискретной и о неустойчивости решения в форме чирпованного солитона.

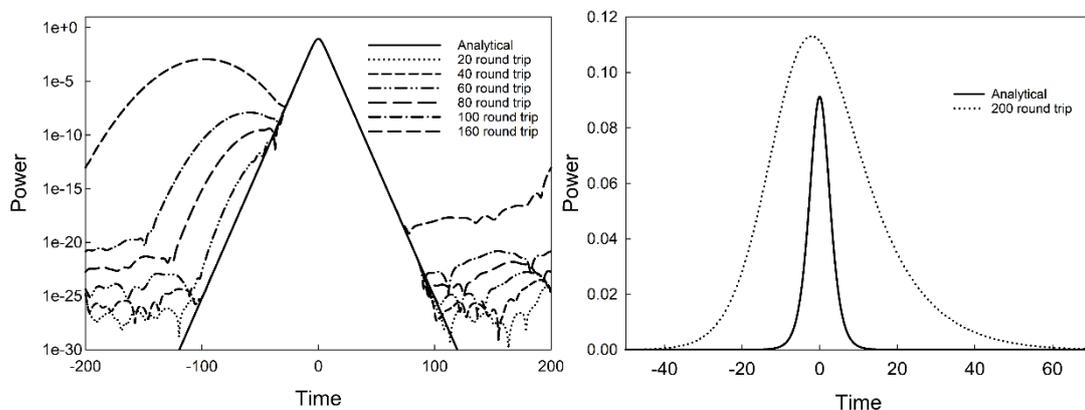


Рисунок 3. Распространение чирпованного солитона.

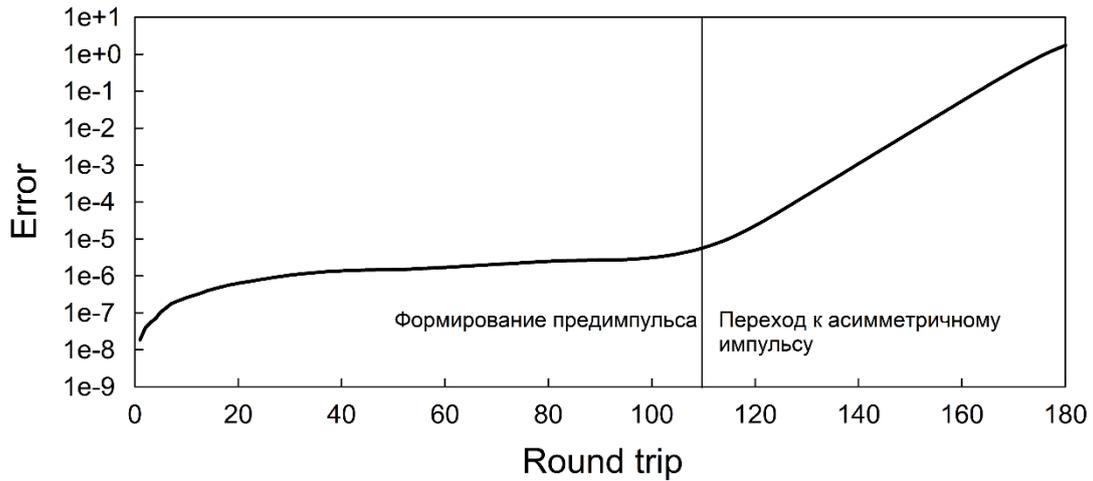


Рисунок 4. Ошибка при распространении chirпованного солитона

Однако данное несимметричное решение распределенного уравнения в дальнейшем разрушается из-за неограниченного роста шумов, что тоже наблюдалось ранее при дискретном моделировании. В том случае проблема решилась включением в схему насыщающегося поглотителя, поэтому далее в распределенную модель был включен член, описывающий действие насыщающегося поглотителя. Два следующих уравнения – модифицированные математические модели с учетом действия насыщающегося поглотителя.

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

$$\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{i\sigma_b}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - i|u|^2 u = \delta u + \eta \left(\frac{\partial}{\partial \tau} + i\Omega_f \right)^2 u + s|u|^2 u - \sigma|u|^4 u - \rho(1 - i\alpha_H)u \int_{-\infty}^{\tau} |u(\tau')|^2 d\tau'$$

Для этих уравнений выписаны аналитические решения, получены аналитические выражения для основных характеристик излучения и ограничения на области существования этих решений. Численно исследована устойчивость аналитических решений данных распределенных моделей. Численный анализ показал неустойчивость решения в форме солитонов (2) и (3) и для модифицированных моделей тоже. Мы считаем, что это связано с несимметричным видом слагаемого, отвечающего за усиление

Эффект от использования кластера в достижении целей работы. Для осуществления целей работы были использованы вычислительные ресурсы ИВЦ НГУ. Так как гибридный волоконный лазер с полупроводниковым оптическим усилителем - сложная многопараметрическая система, для его исследования и оптимизации требуется достаточно много вычислительных ресурсов, недоступных на обычных ПК.

Грантовая поддержка. Работа выполнена при поддержке Российского Научного фонда (грант № 21- 42-04401).

Публикации.

Художиткова Д.А., Беднякова А.Е., Федорук М.П. Теоретическое и численное исследование импульсных режимов генерации в гибридных волоконных лазерах на основе полупроводникового оптического усилителя // Труды Международного семинара по волоконным лазерам. – 2024. – С. 164–165. DOI: 10.31868/RFL.2024.164-165.

Художиткова Д.А., Беднякова А.Е. Математическое моделирование гибридных волоконных лазеров на основе полупроводникового оптического усилителя // Нелинейная фотоника: материалы VIII Международной школы молодых ученых. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2024. – С. 64–65. DOI: 10.31868/RFL.2024.164-165.

Литература.

- [1] A.E. Bednyakova, D.A. Khudozhitkova et al, Opt. Lett. 46, 4757-4760 (2021).
- [2] A. Bednyakova, D. Khudozhitkova & S. Turitsyn, Scientific Reports 12 (2022)
- [3] S.K. Turitsyn, Opt. Lett. 48, 3351-3354 (2023)