

Тема работы:

Математическое моделирование волоконных лазеров с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации.

Состав коллектива:

1. Яровиков Арсений Павлович, 1 курс магистратуры ММФ НГУ, исполнитель
2. Беднякова Анастасия Евгеньевна, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории численного и экспериментального моделирования новых устройств фотоники НГУ, основное место работы – Новосибирский государственный университет, руководитель
3. Яруткина Ирина Александровна, к.ф.-м.н., инженер в лаборатории численного и экспериментального моделирования новых устройств фотоники НГУ, основное место работы – Новосибирский государственный университет, исполнитель
4. Скидин Антон Сергеевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории вычислительных технологий ИВТ СО РАН, основное место работы – Институт вычислительных технологий СО РАН, исполнитель
5. Ефремов Семен Андреевич, аспирант НГУ, инженер в лаборатории численного и экспериментального моделирования новых устройств фотоники НГУ, основное место работы – Новосибирский государственный университет, исполнитель
6. Штырина Ольга Владимировна, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории вычислительных технологий ИВТ СО РАН, основное место работы – Институт вычислительных технологий СО РАН, исполнитель
7. Художиткова Дарья Алексеевна, магистрант НГУ, исполнитель

Информация о гранте:

РНФ № 17-71-20082 «Математическое моделирование генерации комплексов диссипативных солитонов в волоконных лазерах для телекоммуникационных приложений», руководитель – Беднякова Анастасия Евгеньевна, 2017-2020

Научное содержание работы:

В настоящее время для фемтосекундных волоконных лазеров существует множество различных областей применения, таких как CARS-спектроскопия, генерация излучения в терагерцовом диапазоне, частотная метрология, волоконно-оптические линии связи. Данные применения вызывают необходимость создания лазеров, способных генерировать импульсы, устойчивые на больших расстояниях, с все более высокой энергией и меньшей длительностью.

Формирование импульса в резонаторе происходит за счет синхронизации мод, которая может осуществляться с помощью нелинейного кольцевого зеркала, полупроводникового насыщающегося поглотителя или на основе эффекта нелинейного вращения поляризации (НВП). Последний способ позволяет получать импульсы с наибольшей энергией и применялся в большинстве работ, где были достигнуты высокие значения энергии при малой длительности импульса.

В данной работе рассмотрен фемтосекундный волоконный лазер с синхронизацией мод на основе эффекта НВП. В 2013 г. в статье [A. E. Bednyakova, S. A. Babin, D. S. Kharenko, E. V. Podivilov, M. P. Fedoruk, V. L. Kalashnikov, and A. Apolonski, Evolution of dissipative solitons in a fiber laser oscillator in the presence of strong Raman scattering, Optics Express Vol. 21, Issue 18, pp. 20556-20564 (2013).] для описания работы такого лазера была предложена скалярная математическая модель, в которой распространение сигнала в резонаторе описывалось с помощью обобщенного нелинейного уравнения Шредингера (ОНУШ):

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + i \gamma A(z, t) \int_0^{\infty} R(t') |A(z, t - t')|^2 dt',$$

на участке световода с сохранением линейной поляризации (PM – polarization maintaining), а результат прохождения сигнала через участок стандартного одномодового волокна (SM – single mode), на котором происходит вращение эллипса поляризации, моделировался точно с помощью заданной аналитически функции пропускания:

$$\rho(P) = \rho_{max} - \left(\frac{P}{P_{cr}} - 1\right)^2 (\rho_{max} - \rho_{min}).$$

Такое допущение было возможно за счет того, что длина SM-световода (~1,5 м) была значительно меньше длины PM-световода (30-120 м). В данном случае результаты численного моделирования хорошо согласовывались с данными, полученными в эксперименте.

У лазера, представленного в более поздней работе [Denis S. Kharenko, Innokentiy S. Zhdanov, Anastasia E. Bednyakova, Evgeniy V. Podivilov, Mikhail P. Fedoruk, Alexander Apolonski, Sergei K. Turitsyn, Sergey A. Babin, All-fiber highly chirped dissipative soliton generation in the telecom range, Optics Letters Vol. 42, Issue 16, pp. 3221-3224 (2017).], длины PM- и SM-световодов были сравнимы, и использование той же скалярной модели дало лишь качественное согласование расчетов с экспериментом, а значения энергии импульса, посчитанные и измеренные, оказались различны: 2,5 нДж и 0,93 нДж соответственно. В связи с этим была предложена гибридная модель, в которой более подробно рассматривается действие эффекта НВП: переход от линейной поляризации к эллиптической и обратно происходит соответственно с помощью четверть- и полуволновой пластинок и поляризационного светоделителя (ПСД), которые моделируются точно, а эволюция двух круговых компонент поляризации вдоль оси резонатора описывается с помощью системы нелинейно связанных ОНУШ:

$$\frac{\partial E_{\pm}}{\partial z} = \left(i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} - i\gamma I \pm \frac{i\gamma}{3} (|E_+|^2 - |E_-|^2) \right) E_{\pm}, \quad I = |E_+|^2 + |E_-|^2.$$

Целями работы являлись реализация гибридной модели, сравнение скалярной и гибридной моделей на основе результатов численного моделирования и определение области применимости скалярной модели.

Для проведения расчетов использовался симметричный метод расщепления по физическим процессам (на примере скалярного уравнения, правая часть разбивается на операторы дисперсии и нелинейности):

$$A_{k+1} = \exp \left(\int_z^{z+\frac{h}{2}} \hat{N}(A(z'), z') dz' \right) \exp(h\hat{D}) \exp \left(\int_{z+\frac{h}{2}}^{z+h} \hat{N}(A(z'), z') dz' \right) A_k,$$

$$\hat{D} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3}, \quad \hat{N}(A, z) = i\gamma A(z, t) \int_0^{\infty} R(t') |A(z, t - t')|^2 dt'.$$

Шаг дисперсии имеет аналитическое решение и вычисляется с помощью алгоритма Быстрого преобразования Фурье (БПФ):

$$\exp(h\hat{D})A_k = IFFT \left[\exp \left(\frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 h + \frac{i}{6} \beta_3 \omega^3 h \right) FFT(A_k) \right].$$

Также с помощью БПФ вычисляется интеграл сверточного типа $\int_0^{\infty} R(t') |A(z, t - t')|^2 dt'$. Затем численное решение на нелинейном шаге ищется с помощью явного метода Рунге-Кутты второго порядка.

В результате вычислений найдены наборы значений параметров гибридной модели, при которых устанавливается стабильный режим генерации; среди них выбраны те, для которых результаты, полученные в гибридной и скалярной моделях, наиболее близки. Для таких наборов параметров построены кривые пропускания на участке вращения эллипса поляризации и исследовано влияние изменения углов поворота четверть- и полуволновой пластин (χ и ψ , соответственно) на параметры кривой пропускания.

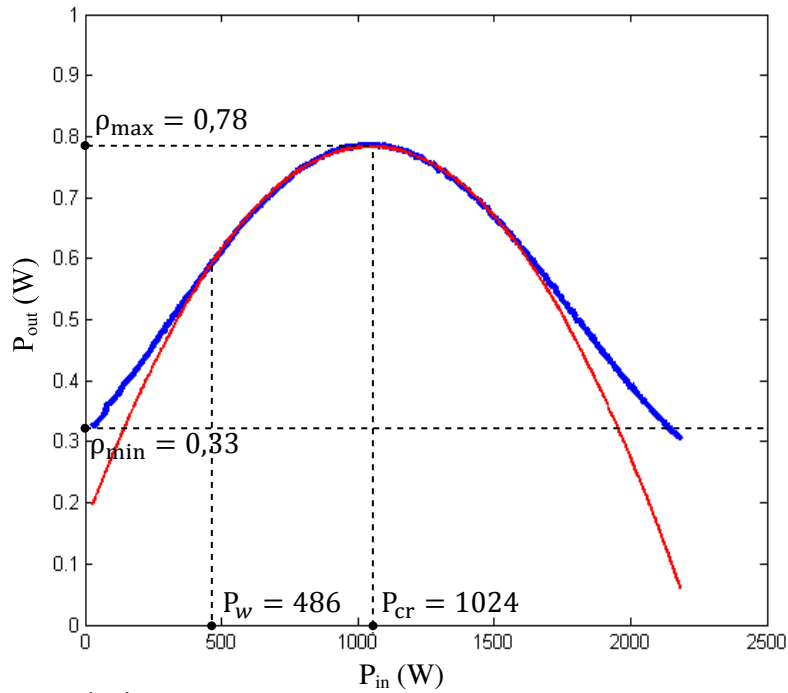


Рис. 1. $\rho(P_{in}) = \frac{P_{out}(P_{in})}{P_{in}}$; синяя кривая – построенная по результатам численного эксперимента, красная – ее аппроксимация параболой; P_w – пиковая мощность импульса перед ПСД; $\chi = 0,15\pi$, $\psi = 0,6\pi$.

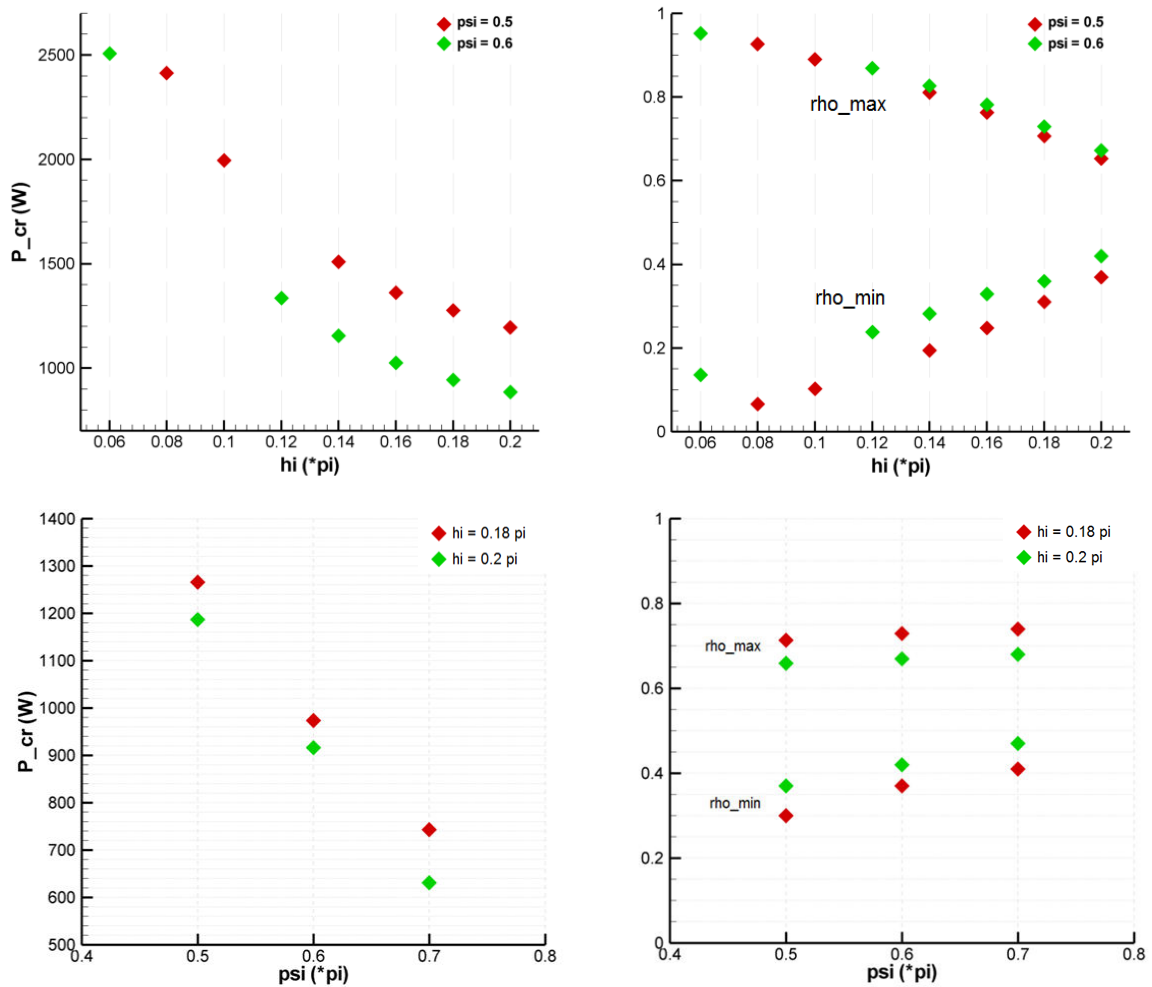


Рис. 2. Зависимость P_{cr} , ρ_{max} и ρ_{min} от χ и ψ

Также показано, что в случае, когда длина световода без сохранения поляризации сравнима с длиной световода с сохранением поляризации, скалярная модель неприменима для моделирования волоконного лазера, поскольку кривые пропускания для такой схемы не только отличаются значениями параметров P_{cr} , ρ_{max} и ρ_{min} , но и имеют качественно иной вид, отличный от параболы.

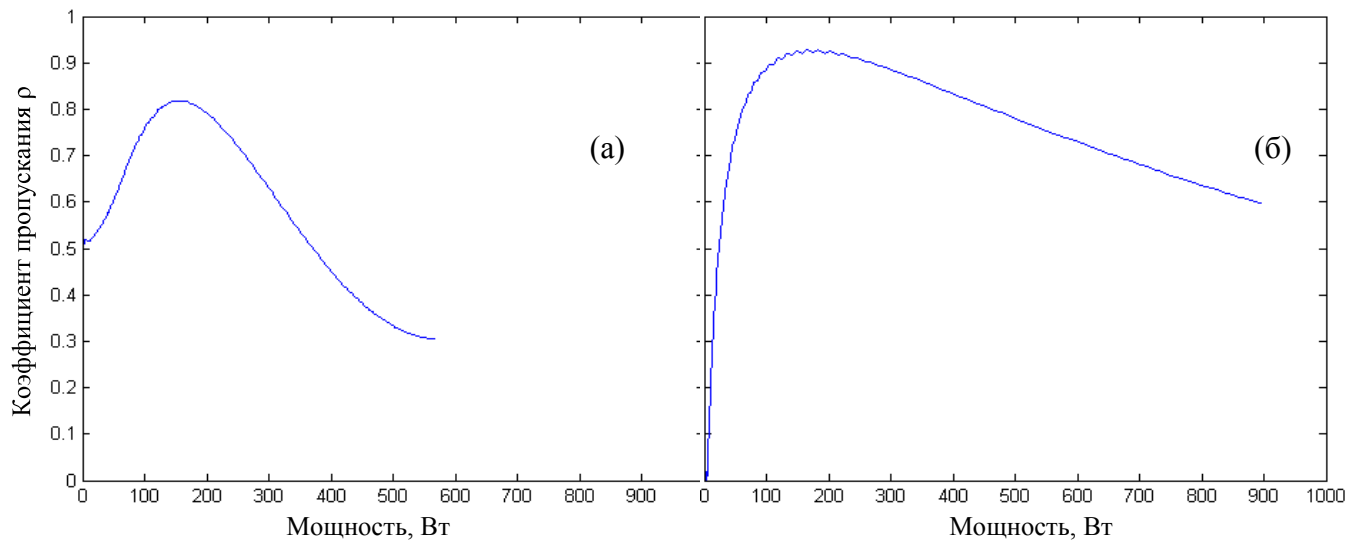


Рис. 3. Кривые пропускания для режимов (а) $\{freq = 0,215, \chi = 0,2\pi, \psi = 0,5\pi\}$ и (б) $\{freq = 0,215, \chi = 0,05\pi, \psi = 0,5\pi\}$

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Использование кластера позволило значительно сократить время вычислений.