

Численное исследование сверхширокополосного фемтосекундного волоконного лазера на основе эффекта НВП

Ефремов Владислав Дмитриевич

и.о. младшего научного сотрудника тем. группы 17-1 ИАиЭ СО РАН

Харенко Денис Сергеевич

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник тем. группы 17-1 ИАиЭ СО РАН

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания ИАиЭ СО РАН (проект № 121030500067-5, рук. Бабин С.А., 2021-2023 гг.)

Аннотация

Для иттербиевого волоконного лазера с синхронизацией мод на основе эффекта НВП была разработана и исследована численная модель, которая показала полное согласие с экспериментальными данными. Это позволило объяснить причину генерации импульсов со сверхшироким спектром в данной схеме. Также впервые предсказывается возможность генерации импульсов шириной оптического спектра до 100 нм без использования высоконелинейных волокон и компенсаторов дисперсии, а за счет уменьшения коэффициент пропускания SAM для низкой мощности, что предотвращает переход к многоимпульсным режимам генерации при увеличении мощности накачки.

1 Постановка задачи

Иттербиевые волоконные лазеры с синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации (НВП) являются источниками мощных фемтосекундных импульсов. С учётом спектрального фильтра, который часто используется в таких схемах для стабилизации синхронизации мод, типичные значения ширины оптического спектра генерируемых импульсов находятся в пределах 20 нм. Однако в эксперименте впервые были получены сверхширокие импульсы (около 60 нм по уровню -10 дБ) без использования каких-либо специальных методов, вроде компенсации дисперсии. Поэтому объяснение данного феномена является мотивацией для численного исследования.

2 Численное моделирование

Алгоритм моделирования был составлен на основе экспериментальной установки. Её подробное описание, а также экспериментальных и численных результатов, можно найти в статье [1]. В экспериментальной установке использовались активное иттербиевое волокно (YDF), одномодовое волокно (SMF) и волокно с сохранением поляризации (PMF). Все перечисленные волокна моделировались как одномодовые со следующими параметрами: $\beta_2 = 22 \text{ пс}^2/\text{км}$, $\beta_3 = 0.037 \text{ пс}^3/\text{км}$, $\gamma = 6 \text{ (Вт}\cdot\text{км)}^{-1}$. В соответствии с экспериментально измеренными значениями ширина спектрального фильтра на полувысоте была взята 1.63 нм, центральная длина волны – 1043.3 нм, а потери составили 50 %. Моделирование синхронизации мод на основе НВП было реализовано через моделирование самоамплитудной модуляции (self-amplitude modulation, SAM) в виде точечного воздействия на поле через функцию пропускания:

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

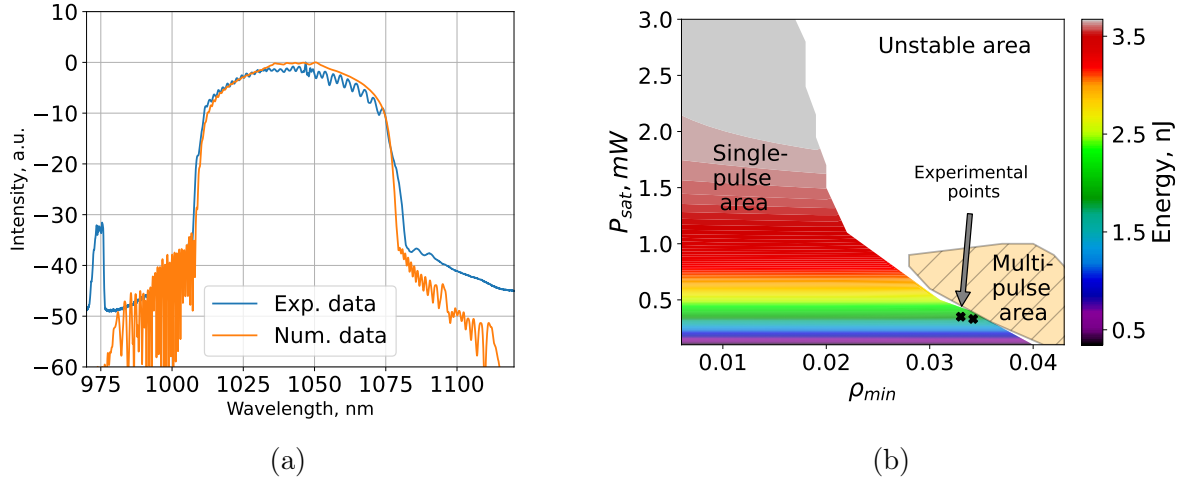


Рис. 1: Сравнение экспериментальных и численных результатов (a). Энергия импульсов стабильной области: одноимпульсных и многоимпульсных режимов (b). Крестиками обозначены режимы, соответствующие эксперименту.

где ρ_{min} определяет минимальное пропускания при низких мощностях, а ρ_{max} максимальное пропускание при критической мощности P_{cr} . Максимум пропускания при критической мощности был подобран $\rho_{max} = 0.8$. Остальные параметры SAM, ρ_{min} и P_{cr} варьировались в ходе численного исследования.

3 Результаты и обсуждение

В ходе численного моделирования были подобраны параметры модели, при которых полученный спектр и длительность импульса отлично согласуются с экспериментальными данными (Рис. 1a). Была численно исследована внутрирезонаторная динамика импульса, которая позволила сделать вывод о самоподобном характере формирования импульса и объяснить его значительное уширение без распада на субимпульсы и без перехода в многоимпульсный режим. При варьировании таких параметров, как ρ_{min} и P_{cr} , была найдена область режимов стабильной генерации. Она представлена на Рис. 1b в терминах выходной энергии импульсов. Хорошо видно, что при уменьшении ρ_{min} и увеличении накачки можно добиться возрастания энергии импульса, а соответственно и ширины спектра. Это неожиданный результат, так как считалось, что ρ_{min} не влияет напрямую на параметры генерируемых импульсов. Однако, как выяснилось, от него зависит возможность достижения ширины оптического спектра в 100 нм при энергии импульса до 3.6 нДж.

4 Эффект от использования кластера

Так как невозможно оценить параметры SAM экспериментально, их пришлось подбирать вручную вместе с параметрами усиления с эффектом насыщения. Всё это удалось сделать лишь благодаря использованию графических ускорителей NVIDIA Tesla V100, которые позволили быстро провести расчёты большого числа точек в пространстве параметров резонатора и построить области стабильной генерации импульсов. По последним оценкам выигрыш по времени был более, чем в 50 раз по сравнению с расчётами на центральном процессоре.

Литература

- [1] Abdrakhmanov, S.I.; Efremov, V.D.; Kuznetsov, A.G.; Kharenko, D.S.; Babin, S.A. Ultra-Broadband NPE-Based Femtosecond Fiber Laser. *Photonics* 2023, 10, 85. <https://doi.org/10.3390/photonics10010085>