

Численное исследование предела энергии в пикосекундном оптоволоконном оптическом параметрическом задающем генераторе

Ефремов Владислав Дмитриевич, аспирант, и.о. инженера-исследователя ИАиЭ СО РАН
Харенко Денис Сергеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Лаб.17 ИАиЭ СО РАН

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект № 21-72-30024, рук. Бабин С.А., 2021-2024 гг., проект № 22-22-20111, рук. Харенко Д.С., 2022-2023 гг.).

Аннотация

Представлена инновационная схема волоконного оптического параметрического генератора с двухплечевой синхронной накачкой. Проведено её численное моделирование в широком диапазоне параметров. Использование библиотеки PyOFSS и ресурсов графического процессора посредством процедур OpenCL позволило найти области существования стабильных режимов генерации параметрических импульсов в зависимости от пиковой мощности импульсов накачки и их временного перекрытия с параметрическими импульсами (относительная задержка) при отстройке несущей длины волны импульсов накачки в плечах до 1 нм и при использовании фотонно-кристаллического волокна (ФКВ) длиной 33 и 43 см. Показано, что данная двухплечевая синхронная накачка даёт возможность почти в два раза по сравнению с линейной схемой увеличить максимальную энергию генерируемых импульсов (до 57 нДж) и действует подобно двум расстроенным фильтрам в генераторе Мамышева, позволяя получать импульсы с параметрами, недоступными при использовании других схем.

Постановка задачи

Последние успехи в моделировании волоконного оптического параметрического генератора (ВОПГ) с использованием ресурсов графического процессора [1] позволяют решать не только оптимизационные задачи для известных оптических схем резонатора, но и исследовать новые конфигурации, реализация которых в эксперименте может быть сопряжена с большими временными и/или материальными затратами. В данной работе мы провели численное моделирование инновационной схемы ВОПГ с двухплечевой синхронной накачкой, с отстройкой их несущих длин волн. Исследовались зависимости режимов генерации от пиковой мощности накачки и её временного перекрытия с параметрическим импульсом, а также от длины ФКВ. Перекрытие импульсов контролировалось величиной временной задержки, вносимой в резонатор. Построены карты стабильных режимов генерации параметрических импульсов при 33 и 43 см ФКВ с одинарной накачкой и с отстройкой на 1 нм по центральной длине волны импульсов накачки в плечах. При этом соблюдались все те же условия, что и при моделировании обычной схемы ВОПГ: высокое спектральное разрешение порядка 150 МГц, широкое расчётное окно от 433 нм до 3100 нм, включающее 2 млн точек (2^{21}) с двойной точностью, достаточно мелкий шаг по пространственной координате и высокие требования к стабильности установившегося режима.

Численное моделирование

В качестве основы численной модели ВОПГ с двухплечевой синхронной накачкой была взята модель линейного ВОПГ из предыдущего этапа работ [1]. Алгоритм моделирования параметрического генератора в терминах блоков библиотеки PyOFSS представлен на Рисунке 1. Здесь волокна (PCF, PM780-HP) моделируются обобщённым нелинейным уравнением Шрёдингера, а остальные элементы через их точечное воздействие на поле. Каждое плечо имеет одинаковую конструкцию, а процесс генерации состоит в следующем:

1. Через спектрально-селективный разделитель длин волн в схему попадал узкополосный импульс накачки, длина волны которого составляла 1032 нм и 1033 нм в первом и втором плечах соответственно.
2. В ФКВ, при соблюдении условий фазового синхронизма и достаточной пиковой мощности накачки, происходила параметрическая генерация импульсов на длине волны около 800 нм.
3. На зеркале 94 % излучения выходило из резонатора, а 4 % попадали в 50 м пассивного волокна.
4. Линия задержки необходима для контроля перекрытия (согласования) импульсов накачки и параметрических импульсов во времени за каждый обход резонатора.

Плечи накачки считаются независимыми друг от друга, таким образом, в каждом из плеч схемы импульсы накачки могут иметь различные несущие длины волн и попадать в разные точки кривой фазового синхронизма, что приводит к генерации в разных спектральных областях. При определённой задержке и пиковой мощности накачки параметрическое усиление будет перекрываться в области 788 нм. Таким образом, двухплечевая накачка будет действовать подобно смещённым спектральным фильтрам в генераторе Мамышева.

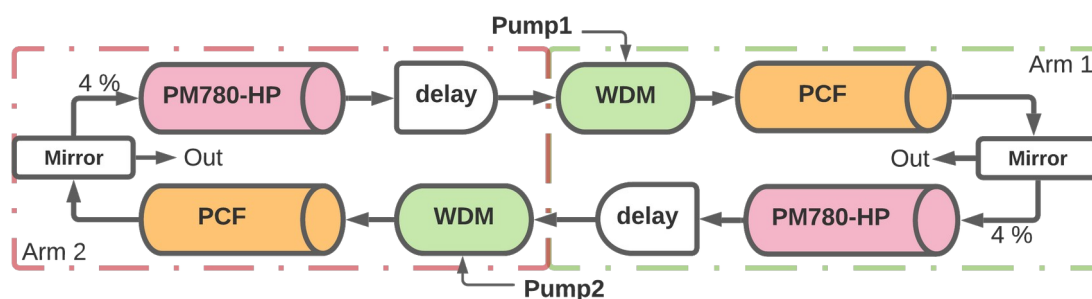


Рисунок 1. Алгоритм распространения импульса в численной модели волоконного оптического параметрического генератора с двухплечевой синхронной накачкой. WDM — спектрально селективный разветвитель, PCF — фотонно-кристаллическое волокно, PM780-HP — пассивное волокно, delay — регулируемая задержка для компенсации разницы в дисперсии групповых скоростей, Mirror — «зеркало» с коэффициентом отражения 4%, Pump1, Pump2 — первое и второе плечо накачки соответственно.

Результаты и обсуждение

Один из наиболее интересных результатов счёта представлен на Рисунке 2. Здесь слева и справа представлены области существования стабильных режимов генерации с обоих выходов при различных центральных длинах волн импульсов накачки: 1032 нм в 1-м плече и 1033 нм во 2-м плече. Помимо изменения формы области, диапазон по задержке увеличился, а порог генерации по пиковой мощности накачки составил 1,2 кВт. Причём, различие

энергий на разных выходах генератора при одинаковых режимах хорошо заметно. Фактически наблюдается зеркальное отражение по уровню достижимых энергий - при меньших задержках максимум приходится на выход 1-го плеча, а при больших - на 2-ое плечо. При этом выросла максимально достижимая энергия параметрических импульсов (с 43 нДж до 57 нДж) по сравнению со случаем одноплечевой накачки. Такой эффект можно объяснить влиянием отстроенных по длине волны относительно друг друга импульсов накачки, которые препятствуют разрушению режима генерации при больших мощностях. Сдвиг по центральной длине волны при изменении величины задержки вырос почти до 10 нм, что в линейной схеме при тех же длинах волокна ограничивалось 6 нм. Также в два раза выросла максимальная ширина спектра. Отсюда уже можно сделать вывод, что в данной схеме ВОПГ с двухплечевой синхронной накачкой существуют режимы генерации параметрических импульсов, недоступных в обычных схемах ВОПГ с одноплечевой накачкой.

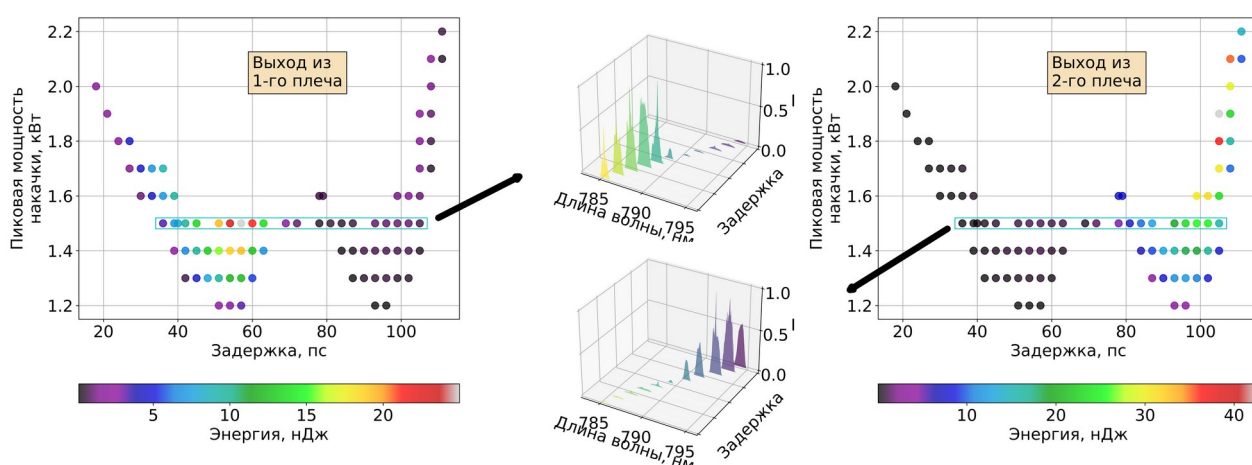


Рисунок 2. Область существования стабильных режимов генерации в терминах выходной энергии параметрических импульсов при 43 см ФКВ: из 1-го плеча с центральной длиной волны накачки 1032 нм (слева), из 2-го плеча с центральной длиной волны накачки 1033 нм (справа). Спектры генерируемых импульсов при 1.5 кВт и различных величинах задержки с обоих выходов (по центру).

Кроме областей на Рисунке 2 также представлены спектры параметрических импульсов с обоих выходов при 1,5 кВт пиковой мощности накачки и различных последовательных значениях задержки (центральная часть). По ним хорошо видно, как точки максимальной энергии в обоих плечах сосредоточены в противоположных концах линии режимов генерации. Это наглядная демонстрация того, какое влияние оказывает на ВОПГ двухплечевая синхронная накачка, действуя подобно смещённым спектральным фильтрам в генераторе Мамышева. Данный метод накачки представляет особый интерес ввиду того, что позволяет генерировать уникальные импульсы, недоступные при стандартной одноплечевой накачке, и может быть расширен и на другие конфигурации волоконных лазеров, например, использующих эффект ВКР. Полученные результаты были доложены на международной семинаре по волоконным лазерам 2022, а также опубликованы в виде научной статьи в журнале Квантовая электроника [2].

Эффект от использования кластера

Расчётное окно в поставленной задаче составляло 2^{21} точек (2 млн), число шагов по пространству на один проход резонатора достигало 600, а типичное число проходов для определения установившегося режима достигало 700. Посчитаны целые области существования стабильного режима генерации при различных параметрах резонатора и импульса накачки. Особый эффект был получен при использовании узла с графическими ускорителями NVIDIA Tesla V100, позволяющим вести одновременный расчёт до 8-ми точек со средним выигрышем по времени в 50 раз (менее 3-х часов на полное установление режима) относительно расчётов на центральном процессоре (до 6-ти суток и более).

Публикации:

[1] V. D. Efremov, A. A. Antropov, E. A. Evmenova, and D. S. Kharenko, “Numerical investigation of energy limit in picosecond fiber optic parametric oscillator,” *Appl. Opt.* 61(7), pp. 1806-1810 (2022)

[2] В. Д. Ефремов и Д. С. Харенко, “Численное исследование схемы волоконного оптического параметрического генератора с двухплечевой синхронной накачкой,” *Квантовая электроника*, Т. 52, № 11, стр. 979–983 (2022).