

## **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 No 21-72-30024, рук. Бабин С.А., 2021-2024 гг.) и РФФИ (проект No 20-32-70093, рук. Харенко Д.С., 2019-2021 гг.).

### **Аннотация**

Проведено масштабное численное моделирование волоконно-оптического параметрического генератора для создания узкополосных импульсов пикосекунды для когерентной антистоксовой Рамановской спектроскопии с использованием библиотеки на языке Python с открытым исходным кодом. Использовался чрезвычайно широкий диапазон параметров, таких как длительность импульса накачки, отстройка параметрической частоты, спектральная ширина импульса накачки и параметрических импульсов. Это потребовало использования чрезвычайно больших окон расчета, как во временной, так и в спектральной областях. Нам удалось ускорить расчёты в 50 раз, используя ресурсы графического процессора посредством процедур OpenCL, что позволило определить области устойчивости для различных длин стандартного пассивного (5-100 м) и фотонно-кристаллического (23-100 см) волокон, используемых во внешнем линейном резонаторе задающего генератора. Было показано, что генерируются сильночирпованные диссипативные солитоны на длине волны около 800 нм, энергия которых может достигать 55 нДж и ограничена истощением накачки и эффектами её фазовой само-модуляции.

### **Постановка задачи**

Наиболее сложной и ресурсоёмкий расчёт - это расчёт оптимальных параметров резонатора параметрического генератора. Сложность моделирования складывается из нескольких составляющих.

1. Высокое спектральное разрешение - требуется для адекватного описания импульса накачки, ширина которого всего 20 пм. Установлено, что итерации начинают адекватно сходиться, когда в спектральной области на импульс накачки приходится не менее 10 точек (по полувысоте). Оптимальным значением является 40 точек, т. е. шаг по частоте в спектральной области составляет величину всего порядка 150 МГц.
2. Широкое спектральное окно необходимо ввиду больших отстроек генерируемых сигнальной и холостой параметрических волн. Так при длине волны накачки 1032 нм, длины волн параметрической генерации составляют 787 нм и 1387 нм, соответственно. Однако для адекватного описания этих компонент необходимо захватить и следующий порядок параметрической генерации. В итоге расчётное окно составляет от 433 нм до 3100 нм и включает 2 млн точек ( $2^{21}$ ) с двойной точностью.
3. Высокие пиковые мощности — порядка 1 кВт - требуют уменьшать шаг по пространственной координате, что приводит к линейному росту времени счёта. Наиболее критичный участок — это отрезок ФКВ в прямом проходе, когда и

происходит параметрическое усиление. Установлено, что для длины ФКВ 30 см оптимальным решением является 20-30 точек по пространству при использовании схемы 4-го порядка точности.

4. Долгое время установления. Использование белого шума в качестве начального приближения требует от 700 обходов резонатора параметрического генератора, чтобы достигнуть уровня относительного изменения энергии, длительности и спектральной ширины генерируемого импульса меньше чем  $10^{-6}$ .

### Численное моделирование

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. Отправная точка — ввод излучения накачки через WDM. Далее распространение в фотонно-кристаллическом волокне, выход излучения, отражение 4% обратно, обратное распространение в PCF и наконец прямое и обратное распространение в пассивном волокне и корректировка задержки для совмещения параметрического импульса с импульсом накачки на новом обходе. Счёт вёлся до установления, т. е. до уменьшения относительного изменения ниже определённого порога по трём параметрам — энергия, спектральная ширина и длительность импульса.

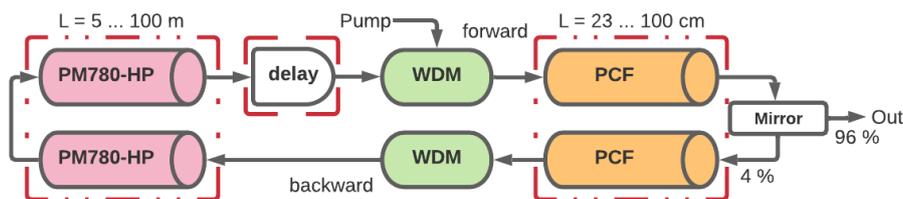


Рисунок 1. Алгоритм распространения импульса в численной модели волоконного оптического параметрического генератора. WDM — спектрально селективный разветвитель, PCF — фотонно-кристаллическое волокно, PM780-HP — пассивное волокно, delay — регулируемая задержка для компенсации разницы в дисперсии групповых скоростей.

### Результаты и обсуждение

Мы определили все необходимые параметры численной модели, провели ряд тестовых расчётов и в итоге определили области устойчивости для различных длин стандартных пассивных (5–100 м, рисунок 2) и фотонно-кристаллических (23–100 см, рисунок 3) волокон, используемых во внешнем линейном резонаторе параметрического генератора. Установлено, что при увеличении длины резонатора параметрического генератора волокном типа Nufern 780PM с нормальной дисперсией существуют области параметров, где энергия генерируемых параметрических импульсов составляет десятки нДж. Типичное значение параметра чирпа составляет порядка 8, а ширины оптического спектра порядка 0.6 нм.

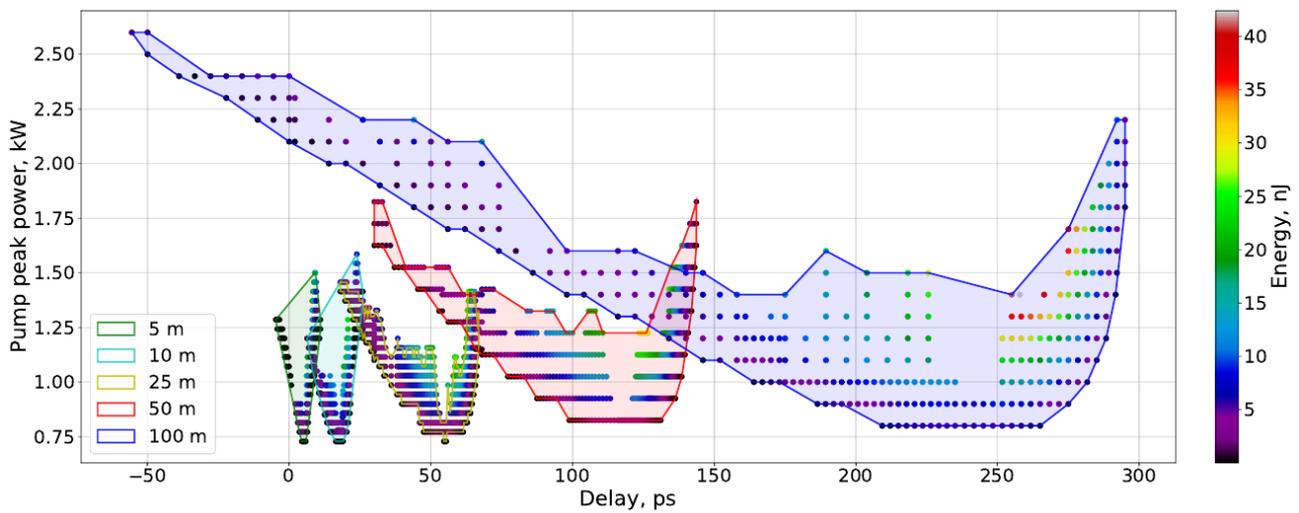


Рисунок 2. Области устойчивых режимов работы при различной длине пассивного волокна по выходной параметрической энергии импульса и временной задержке.

Было также показано, что генерируются СЧДС на длине волны около 800 нм и с энергией до 55 нДж, которая ограничивается эффектами истощения накачки и фазовой самомодуляции. Важно отметить, что подобного оптимизационного исследования для волоконных параметрических генераторов ещё не проводилось. В имеющихся работах численное моделирование зачастую служило инструментом для исследования лишь внутривибрационной динамики излучения при фиксированных параметрах резонатора и демонстрации согласия между моделированием и экспериментом. Кроме того, расчёты выполнены с использованием библиотеки с открытым исходным кодом, что делает их доступными для сообщества. Полученные результаты были доложены на международной конференции Photonics Asia 2021 опубликованы в сборнике трудов [1]. Также результаты работы опубликованы в виде научной статьи в журнале Applied Optics [2].

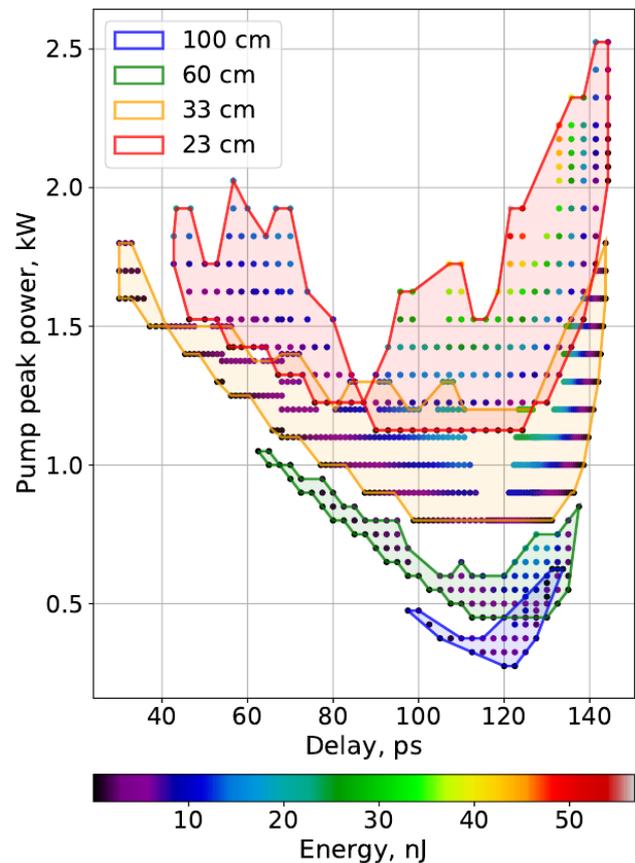


Рисунок 3: Области устойчивых режимов генерации при различных длинах фотонно-кристаллического волокна в терминах выходной энергии параметрического импульса и временной задержки.

### **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 simulation of a picosecond fiber optical parametric oscillator based on a PCF," in Proc. SPIE, 2021, vol. 11905, p. 119051L.

[2] 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), (2022) (in print)