

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ПОШАГОВОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ (МПР) В ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ*

✉ Г. В. Тертышникова, Д. Г. Санников

Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

✉ tertyshnikovag@mail.ru

В настоящее время создаются волоконно-оптические системы (например, кольцевые резонаторы с синхронизацией мод [1], волоконные компрессоры, дающие ультракороткие импульсы [2] и т. д.), в которых распространяются и взаимодействуют импульсы различной начальной формы. Распространение ультракоротких импульсов в одномодовых волоконных световодах обычно описывается с помощью обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера [3]. Для его решения широко используется метод пошагового расщепления (МПР) Фурье (*SSFM — split step Fourier method*) [4]. При этом обычно используются простые (*coarse*) и улучшенные (*precise*) схемы 2-го порядка точности по h с постоянным / переменным шагом (*constant / variable step*) и т. д. [5]. При (входной) длительности импульсов $T_0 \geq 0,1$ пс уравнение распространения импульса имеет вид

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -i \frac{\alpha}{2} A + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma |A|^2 A. \quad (1)$$

Здесь $A[\sqrt{\text{Вт}}]$ — медленноменяющаяся огибающая напряженности электрического поля волны, α — коэффициент поглощения [м^{-1}]; β_2 — дисперсия групповых скоростей (ДГС) [$\text{с}^2/\text{м}$]; $T = t - z / v_g$ — время [с], измеряемое в «бегущей» системе отсчета, движущиеся с групповой скоростью импульса v_g ; γ — нелинейный коэффициент [$\text{Вт}^{-1} \times \text{м}^{-1}$].

В настоящей работе изучается использование МПР для моделирования распространения импульсов разной формы в различных волокнах с учетом нелинейности и дисперсии. С помощью оригинальной программы (на языке Mathematica) были произведены расчеты по схеме «*coarse; constant step*», в ходе которых подбирались шаги разбиения по координате и времени (h и n соответственно). На рис. 1 приводятся временные зависимости амплитуды электрического поля для разных импульсов на выходе кварцевого волокна длиной ($z = 1000$ м) с учетом нелинейности и потерь. Выбор параметров и сопоставление решений по МПР с «эталонными», полученными с помощью функции *NDSolve*, дает неплохое соответствие кривых везде, кроме пика, где для МПР импульс увеличивается по амплитуде, а его пик смещается вправо от центра симметрии. На рис. 2 приводятся аналогичные рис. 1 зависимости, полученные для волокна ThorLabs HN1550. Разница между эталонными кривыми и кривыми для МПР также невелика. В отличие от вышеприведенного случая, «крылья» секанс- и гауссова импульсов содержат боковые пики, уменьшающиеся по амплитуде по направлению от центра. В целом МПР достаточно достоверно описывает поведение рассмотренных импульсов. Полученные результаты дают представление об особенностях МПР, процедурах оптимизации параметров метода (учета нелинейности и дисперсии высших порядков). Мы полагаем, что результаты

* Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00880).

© Г. В. Тертышникова, Д. Г. Санников, 2023

могут быть использованы для изучения распространения импульсов в современных оптических волоконных системах, включая схемы кольцевых лазеров с насыщаемыми поглотителями на основе углеродных нанотрубок [6].

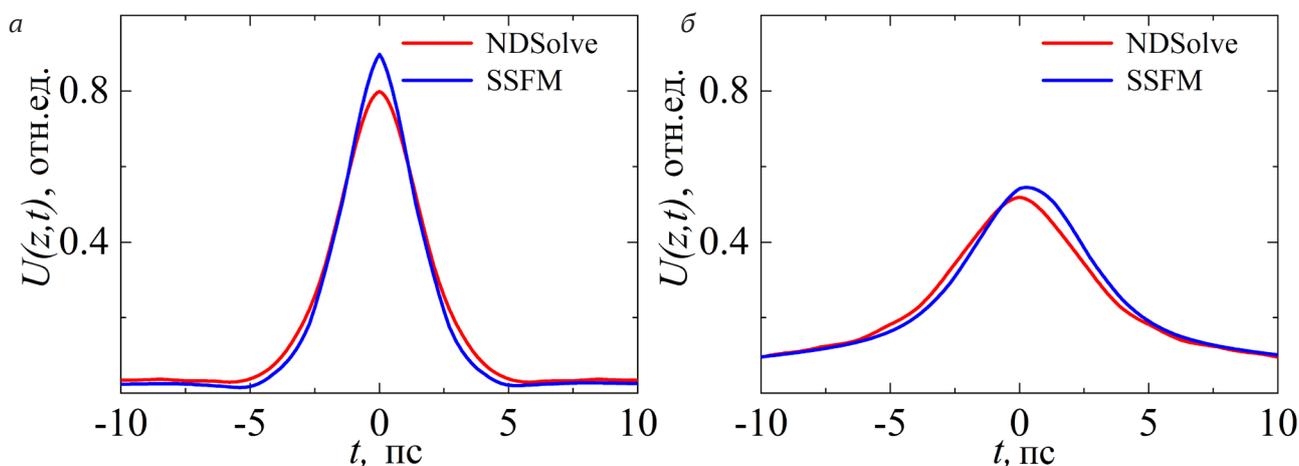


Рис. 1. Огибающие импульсов на выходе кварцевого волокна ($z = 1000$ м). Исходные профили: *а* — гиперболический секанс; *б* — гауссова форма; $n = 150$, $h = 10$ м, $\alpha = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, $\beta_2 = -0,02 \text{ ps}^2/\text{м}$, $\gamma = 0,015 \text{ W}^{-1}\text{м}^{-1}$

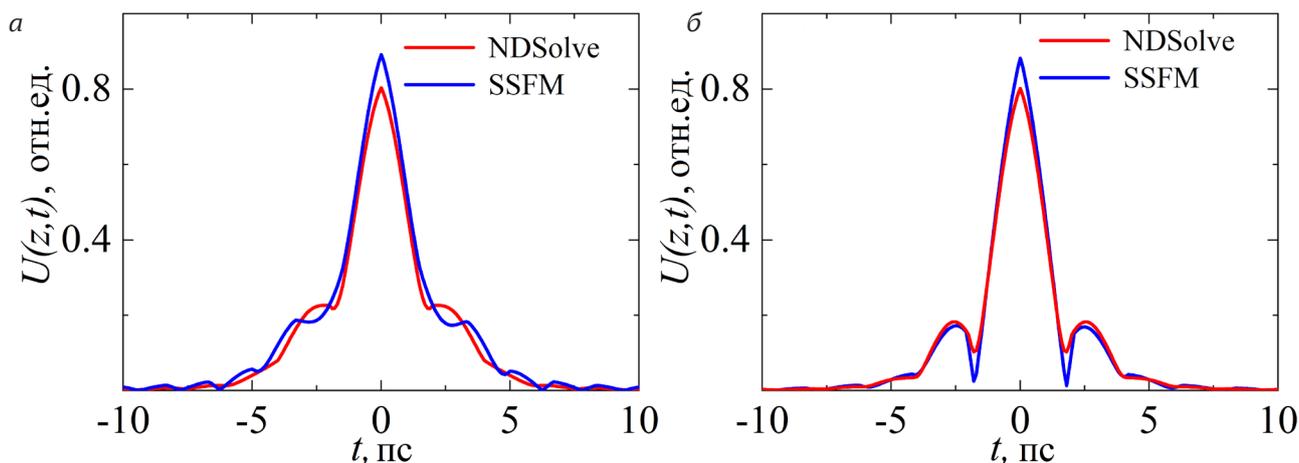


Рис. 2. Огибающие импульсов на выходе из волокна HN1550 ($z = 1000$ м): *а* — гиперболический секанс ($n = 120$); *б* — гауссова форма ($n = 96$); $h = 10$ м, $\alpha = 21 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, $\beta_2 = 0,0013 \text{ ps}^2/\text{м}$, $\gamma = 0,0108 \text{ W}^{-1}\text{м}^{-1}$

Список литературы

1. Korobko D.A., Ribenek V.A., Itrin P.A., Fotiadi A.A. Birth and annihilation of solitons in harmonically mode-locked fiber laser cavity through continuous wave injection // Opt. Fiber Technol. 2023. Vol. 75. P. 103216.
2. Яковлев И. В. Стретчеры и компрессоры для сверхмощных лазерных систем // Квантовая электроника. 2014. Vol. 44. P. 393–414.
3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996.

4. Deiterding R., Glowinski R., Oliver H., Poole S. A reliable split-step fourier method for the propagation equation of ultra-fast pulses in single-mode optical fibers // J. Light. Technol. 2013. Vol. 31. P. 2008–2017.
5. Гутор А.В., Мануйлович Е.С. Выбор оптимального метода моделирования распространения импульсов в волоконных световодах // Труды МФТИ. 2018. Т. 10. С. 19–29.
6. Korobko D.A., Stolyarov D., Itrin P. et al. Saturable absorber for ring fiber lasers on the base of coupler coated by CNTs. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2589130> (SPIE), 11775, 22 (2021).