

Аналитическое приближенное стационарное решение для неконсервативных многосердцевинных волокон

И.С. Чеховской*, Г.А. Патрин, О.В. Штырина, М.П. Федорук

Новосибирский государственный университет

**E-mail: i.s.chekhovskoy@nsu.ru*

DOI:10.31868/RFL.2024.154-155

В последние годы большое внимание уделяется вопросам, связанным с распространением лазерного излучения в многосердцевинных волокнах (multicore fibers – MCFs). За счет использования MCF появляется возможность когерентно усиливать мощные лазерные импульсы с сохранением характеристик излучения и объединять излучение различных лазерных источников в один луч с минимальными потерями мощности. Создание мощных ультракоротких импульсов – это одна из ключевых задач в области фемтосекундной оптики и оптической спектроскопии. Сокращение длительности оптических импульсов до сверхкоротких временных масштабов открывает новые возможности для изучения физических процессов на молекулярном и атомном уровнях.

Однако получение коротких оптических импульсов в MCF является сложной задачей [1,2], требующей точного подбора параметров волокна, а также вводимых в световод лазерных импульсов. В связи с этим, аналитические подходы к исследованию многосердцевинных оптических волокон становятся особенно актуальными. В особенности, необходимы новые модели для моделирования лазеров на основе MCF, а также поиск решений уравнений, используемый в этих моделях. В данной работе предложен теоретический подход к построению стационарных решений для неконсервативных нелинейных уравнений Шрёдингера (CNLSE), с помощью которых можно описать изменение огибающей оптических импульсов лазерной системе с резонатором в виде отрезка MCF.

В частности, в работе представлено приближенное аналитическое стационарное решение в виде пространственно-временного солитона («световой пули»). Использовалась модель для $N_c + 1$ -сердцевинной кольцевой конфигурации расположения сердцевин с центральной сердцевиной (в силу симметрии она сведено к системе двух уравнений: на огибающую в центральной сердцевине и на периферии):

$$\begin{cases} \frac{\partial U_0}{\partial z} = -i \frac{\beta_0}{2} \frac{\partial^2 U_0}{\partial t^2} + i\gamma_0 N_c |U_0|^2 U_0 + iU_1 + \sigma U_0, \\ \frac{\partial U_1}{\partial z} = -i \frac{\beta_1}{2} \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} + i\gamma_1 |U_1|^2 U_1 + i\kappa U_1 + iU_0 - \frac{\alpha_1}{2} U_1, \end{cases}$$

где U_0, U_1 – комплексные огибающие импульсов, t – время, z – пространственная координата, β_2 – параметр дисперсии групповых скоростей, γ – нелинейный коэффициент Керра. Здесь $\kappa = 2 \frac{B_1 - B_0 + 2C_1}{c_0 \sqrt{N_c}}$ – модифицированный коэффициент связи, B_n – константы распространения для различных сердцевин, C_n – коэффициенты связи, $\sigma = \sigma_s/2 - \alpha_{out}/2 - \alpha_0/2$ – разность между усилением и потерями, α_0 – коэффициент линейных потерь, α_{out} – потери на выходе волокна, $\sigma_s = g/(1 + E/E_{sat})$ – коэффициент насыщенного усиления, g – коэффициент

усиления по малому сигналу, $E = \int |U_0(z,t)|^2 dt$ – энергия в центральной сердцевине, E_{sat} – энергия насыщения.

Для нахождения приближенного аналитического решения CNLSE было использовано разложение следующего вида:

$$U_n(z,t) = \rho_n(z,t) \exp(i\Phi_n(z,t)),$$

$$\rho_n(z,t) = \frac{\rho_{n,1}(z)}{\text{ch}(\tau t)} + \frac{\rho_{n,3}(z)}{\text{ch}^3(\tau t)} + \frac{\rho_{n,5}(z)}{\text{ch}^5(\tau t)} + \dots,$$

$$\Phi_n(z,t) = \phi_{n,0}(z) + \frac{\theta}{\tau} \ln(\text{ch}(\tau t)) + \phi_{n,1} \frac{\text{sh}(\tau t)}{\text{ch}(\tau t)} + \frac{\phi_{n,2}}{\text{ch}^2(\tau t)} + \dots$$

Здесь индекс $n = 0, 1$. Данное разложение было подставлено в CNLSE, в результате чего была получена система алгебраических уравнений, определяющая зависимости между амплитудами, фазами и чирпами для разных сердцевин. Приближенное аналитическое решение построено с использованием только нескольких первых членов рассматриваемых рядов.

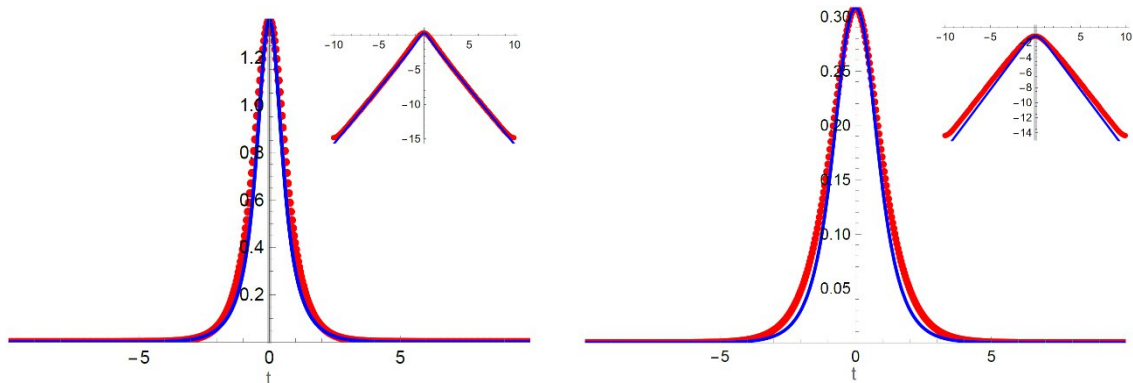


Рис. 1. Сравнение приближенного решения для консервативного случая на основе предлагаемого разложения (синяя линия) и точно стационарного решения, полученного численно (красные точки) в обычном и логарифмическом (вставки) масштабе. Слева решение в центральной сердцевине $0.68 * \text{Sech}[1.6t] + 0.69 * \text{Sech}[1.6t]^3$, справа – в периферийной $0.38 * \text{Sech}[1.6t] - 0.067 * \text{Sech}[1.6t]^3$.

На Рис. 1 представлено найденное приближенное решение. В логарифмическом масштабе видно, что наклон (т.е. параметр τ) подобран правильно. Также заметим, что в разложении для периферийной сердцевин необходима смена знака перед слагаемым с третьей степенью.

В дальнейшем планируется исследование возмущений полученного стационарного решения, что позволит аналитически описать динамику в MCF в тех случаях, когда лазер с резонатором на основе MCF оперирует вблизи стационарного режима.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-11-20040, <https://rscf.ru/project/20-11-20040/> (П.Г.А., Ч.И.С. – численные исследования, Ф.М.П. – постановка задачи). Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания на проведение фундаментальных исследований FSUS-2020-0034 (Ш.О.В.).

Литература

- [1] A. M. Rubenchik, et al., Opt. Lett. **40**, 721–724 (2015)
- [2] I. S. Chekhovskoy, et. al., Phys. Rev. A **94**, 043848 (2016)