

Численное моделирование процесса самоочистки в многомодовом волокне с градиентным профилем показателя преломления при распространении волны накачки и стоксовой компоненты

О.С. Сидельников^{1,*}, Е.В. Подивилов^{1,2}, С.А. Бабин^{1,2}, М.П. Федорук^{1,3}

¹Новосибирский государственный университет

²Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

³Институт вычислительных технологий СО РАН

*E-mail: o.sidelnikov@gnsu.ru

DOI: 10.31868/RFL2020.110-111

Пространственно-временная динамика светового пучка в многомодовых волокнах в настоящее время вновь вызывает интерес как с точки зрения фундаментальной физики, так и в различных областях практического применения [1,2]. Недавние эксперименты в этой области [2,3] показали, что благодаря нелинейному эффекту Керра в многомодовых волокнах с градиентным профилем показателя преломления может наблюдаться процесс самоочистки пучка. В данной работе мы с помощью численного моделирования исследуем процесс самоочистки при одновременном распространении стоксовой волны и волны накачки в многомодовом волокне с параболическим профилем показателя преломления.

Рассматривалось градиентное многомодовое волокно диаметром 100 мкм и длиной 1 км с показателем преломления сердцевины $n_{co} = 1.47$ и $\Delta = 8.8 \cdot 10^{-3}$. По волокну одновременно распространялись две волны – накачка мощностью 150 Вт на длине волны $\lambda_p = 940$ нм и стоксовая компонента мощностью 5 Вт на длине волны $\lambda_s = 980$ нм. На вход подавалась волна накачки, имеющая параболический профиль, заполняющий всю сердцевину волокна. Для стоксовой компоненты использовался гауссов пучок, близкий к фундаментальной моде.

Первым рассматривался случай моделирования процесса распространения стоксовой волны и волны накачки с помощью балансных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dI_s}{dz} &= q_R I_p I_s, \\ \frac{dI_p}{dz} &= -q_R \frac{\lambda_s}{\lambda_p} I_s I_p,\end{aligned}$$

где I_p и I_s — интенсивность накачки и стоксовой компоненты, $q_R = g_R \cdot S_p^{eff}$, $g_R = 0.1$ дБ/(Вт·км) и S_p^{eff} — эффективная площадь накачки. На Рис. 1 (а) представлено входное и выходное распределение для волны накачки и стоксовой компоненты (см. вставку), полученное с помощью балансных уравнений. Как мы можем видеть, волна накачки истощается в центре, и в профиле распределения образуется большое углубление. Это происходит за счет того, что стоксовая компонента имеет небольшой радиус, и в рамках данной модели обмен энергии осуществляется только между точками, имеющими одинаковые пространственные координаты.

Однако балансные уравнения не позволяют описывать эффекты, связанные с дисперсией, нелинейностью и случайной связью пространственных мод. Поэтому в данной работе для численного исследования процесса распространения волны накачки и стоксовой компоненты нами была также рассмотрена система уравнений, основанная на модели связанных мод:

$$\frac{\partial A_{p,m}}{\partial z} = \sum_{m_1,p_1} C_{m,p}^{m_1,p_1} A_{m_1,p_1} - ik_S \frac{n_2}{n_{co}} \sum_{m_1,m_2,m_3} \sum_{p_1,p_2,p_3} f_{p_1,p_2,p_3,p}^{m_1,m_2,m_3,m} (A_{p_1,m_1}^* A_{p_2,m_2} + (2 + if) B_{p_1,m_1}^* B_{p_2,m_2}) A_{p_3,m_3},$$

$$\frac{\partial B_{p,m}}{\partial z} = \sum_{m_1,p_1} C_{m,p}^{m_1,p_1} B_{m_1,p_1} - ik_P \frac{n_2}{n_{co}} \sum_{m_1,m_2,m_3} \sum_{p_1,p_2,p_3} f_{p_1,p_2,p_3,p}^{m_1,m_2,m_3,m} (B_{p_1,m_1}^* B_{p_2,m_2} + (2 + if) A_{p_1,m_1}^* A_{p_2,m_2}) B_{p_3,m_3}.$$

Здесь $A_{p,m}$ и $B_{p,m}$ — амплитуды модовых компонент стоксовой волны и волны накачки соответственно, f — отношение между рамановской и керровской константами и коэффициенты $C_{m,p}^{m_1,p_1}$ соответствуют случайной линейной связи пространственных мод. В качестве начальных данных для такой модели в случае стоксовой компоненты использовалось разложение гауссова пучка соответствующего радиуса на пространственные моды. Для волны накачки все моды изначально имели равные интенсивности и случайные фазы. После усреднения по различным реализациям случайных фаз полученное распределение накачки было близко к параболическому профилю.

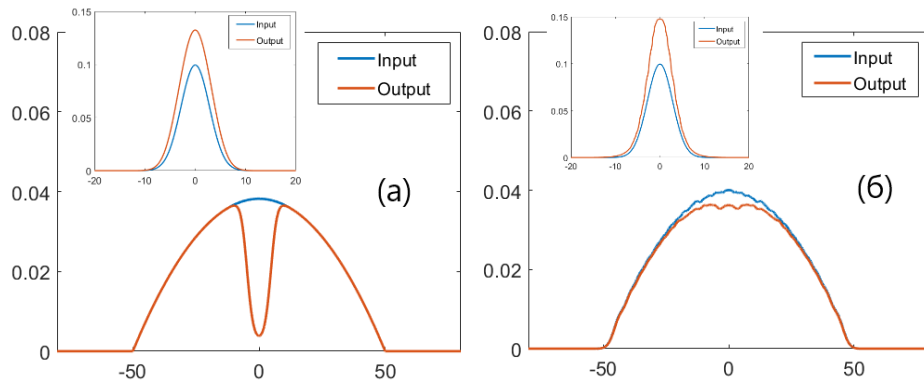


Рис. 1. Входное и выходное распределение для волны накачки, полученное с помощью модели балансных уравнений (а) и модели связанных мод (б).

На Рис. 1 (б) представлено входное и выходное распределение для волны накачки и стоксовой компоненты, полученное с помощью модели связанных мод. Как мы можем видеть, в данном случае за счет случайной линейной связи мод и керровской нелинейности при распространении происходит перетекание энергии в фундаментальную моду накачки, и в профиле распределение возникает лишь небольшое углубление.

Работа Федорука М.П. (теоретический анализ) была выполнена при поддержке проекта РНФ № 20-11-20040. Работа Сидельникова О.С. (математическое моделирование) была поддержана государственным заданием на проведение фундаментальных исследований № FSUS-2020-0034.

Литература

- [1] Y. Wakayama, D. Soma et al, *J. Lightwave Technology* **37**, 404-410 (2019)
- [2] K. Krupa, A. Tonello et al, *Nat. Photon.* **11**, 234 (2017)
- [3] E.V. Podivilov, D.S. Kharenko et al, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 103902 (2019)