Тема работы:

Численное моделирование эволюции импульсов в ВКР-лазере, основанном на изогнутом многомодовом волокие с градиентным профилем показателя преломления.

Состав коллектива:

Сидельников Олег Сергеевич, к.ф.-м.н., с.н.с. ЛНФ НГУ. Федорук Михаил Петрович, чл.-корр. РАН, академик, ректор НГУ.

Информация о гранте:

Государственное задание на проведение фундаментальных исследований № FSUS-2020-0034 "Вычислительные алгоритмы и математическое моделирование нелинейных оптических систем и нелинейной обработки сигналов", рук. Штырина О.В., 2021-2024.

Научное содержание работы:

1. Постановка задачи.

Целью работы является исследование с помощью численного моделирования распространения стоксова пучка и волны накачки в ВКР-лазере, основанном на изогнутом многомодовом волокне с градиентным профилем показателя преломления. В рамках работы выполнялась оптимизация математической модели и сравнение с результатами физических экспериментов.

2. Современное состояние проблемы.

Одномодовые волокна в настоящее время широко применяются в различных областях, таких как оптические коммуникации, сенсорные и лазерные системы, работающие как в линейных, так и в нелинейных режимах. Однако использование одной моды накладывает ограничения на пропускную способность такого волокна, а также на максимальную мощность в волоконных лазерных системах в условиях различных нелинейных эффектов [1].

Поэтому в последнее время активно исследуются многомодовые волокна, которые допускают одновременное распространение нескольких поперечных мод [2]. Одним из наиболее интересных нелинейных эффектов, наблюдаемых при распространении многомодовых сигналов, является эффект пространственной самоочистки пучка, вызванный керровской нелинейностью [3]. Данный эффект заключается в увеличении вклада фундаментальной моды в процессе распространения многомодового пучка в волокне с градиентным профилем показателя преломления. Еще одним важным эффектом, наблюдаемым в многомодовых волокнах, является вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), вызванное нелинейным эффектом Рамана. Анализ усиления слабого сигнала, основанного на перекрытии мод волны накачки и стоксова пучка, показал, что в волокнах с градиентным профилем также может наблюдаться эффект самоочистки пучка, вызванный рамановским усилением [4].

На сегодняшний день остается актуальной проблема точного моделирования распространения сигнала в присутствии эффектов Керра и Рамана в нелинейном режиме, поскольку правильное понимание совместной работы данных эффектов в многомодовых волокнах откроет возможность разработки принципиально новых устройств, основанных на ВКР усилении, и повышения пропускной способности волоконно-оптических линий связи.

- 1. D.J. Richardson, Filling the light pipe // Science 2010. Vol. 330, P. 327-328.
- L.G. Wright, D.N. Christodoulides, F.W. Wise, Controllable spatiotemporal nonlinear effects in multimode fibres // Nature Photonics – 2015. – Vol. 9, P. 306-310.
- K. Krupa, A. Tonello, B.M. Shalaby, M. Fabert, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, V. Couderc, Spatial beam self-cleaning in multimode fibres // Nature Photonics – 2017. – Vol. 11, P. 237-241.
- N.B. Terry, T.G. Alley, T.H. Russell, An explanation of SRS beam cleanup in graded-index fibers and the absence of SRS beam cleanup in step-index fibers // Optics Express — 2007. — Vol. 15, P. 17509-17519.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

В работе исследуется многомодовое волокно с градиентным профилем диаметром 100 мкм (R = 50 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 – волна накачки мощностью 153 Вт (длина волны $\lambda_P = 940$ нм) и стоксов пучок мощностью 5 Вт ($\lambda_S = 980$ нм). Для численного моделирования

процесса эволюции стоксовой волны и волны накачки в многомодовом волокне была рассмотрена система дифференциальных уравнений, основанная на модели связанных мод:

$$\frac{\partial A_{p,m}}{\partial z} = \sum_{m1,p1} C_{m1,m}^{p1,p} A_{p1,m1} - \frac{\alpha_S}{2} A_{p,m} - i \frac{k_S n_2}{\Delta_\beta n_0} \sum_{m1,m2,m3} \sum_{p1,p2,p3} q_{m1,m2,m3,m}^{p1,p2,p3,p} P^S A_{p1,m1}^* A_{p2,m2} A_{p3,m3} - i \frac{k_S n_2}{\Delta_\beta n_0} g_{m1,m2,m3,m}^{p1,p2,p3,p} P^P (2+if) B_{p1,m1}^* B_{p2,m2} A_{p3,m3}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial B_{p,m}}{\partial z} = \sum_{m1,p1} C_{m1,m}^{p1,p} B_{p1,m1} - \frac{\alpha_S}{2} B_{p,m} - i \frac{k_S n_2}{\Delta_\beta n_0} \sum_{m1,m2,m3} \sum_{p1,p2,p3} h_{m1,m2,m3,m}^{p1,p2,p3,p} P^S B_{p1,m1}^* B_{p2,m2} B_{p3,m3} - i \frac{k_S n_2}{\Delta_\beta n_0} l_{m1,m2,m3,m}^{p1,p2,p3,p} P^P (2+if) A_{p1,m1}^* A_{p2,m2} B_{p3,m3}.$$
(2)

Здесь $A_{p,m}$ и $B_{p,m}$ — комплексные амплитуды моды (p,m) стоксовой волны и волны накачки соответственно, p и m — радиальные и азимутальные порядки мод, P_P и P_S — мощности накачки и стоксовой компоненты, $k_{S|P} = 2\pi n_{co}/\lambda_{S|P}$ — волновые числа, $\Delta_{\beta} = \sqrt{2\Delta}/R$, n_2 — нелинейный показатель преломления волокна и f — отношение между рамановской и керровской константами. Коэффициенты $q_{p1,p2,p3,p}^{m1,m2,m3,m}$, $g_{p1,p2,p3,p}^{m1,m2,m3,m}$, n $l_{p1,p2,p3,p}^{m1,m2,m3,m}$ получены путем вычисления интегралов перекрытия пространственных мод волн накачки и стоксовой компоненты.

Данная система уравнений позволяет учитывать эффекты фазовой самомодуляции, кросс-фазовой модуляции, вынужденного комбинационного рассеяния и линейных потерь ($\alpha_S = 2.64 \text{ дБ/км}$ для стоксовой волны и $\alpha_P = 2.72 \text{ дБ/км}$ для волны накачки соответственно). Кроме того, в систему уравнений были включены члены, описывающие случайную линейную связь мод, вызванную несовершенствами волокна, изгибами и механическими напряжениями. В работе рассматривается случай изогнутого многомодового волокна, для которого линейная связь предполагается только между соседними модами с номерами $n_1 = n \pm 1$ и $m_1 = m \pm 1$, где n = 2p + |m| — номер моды. Для таких мод коэффициенты связи $C_{m,p}^{m1,p1}$ задавались нормально распределенными случайными величинами с нулевым средним и стандартным отклонением s. Для остальных мод эти коэффициенты связи $C_{m,p}^{m1,p1}$ задавались нормально распределенными случайными стандартным отклонением s. Для остальных мод эти коэффициенты принимали нулевое значение, что означает отсутствие линейной связи между ними. Значение стандартного отклонения s задает силу случайной линейной связи и оптимизировалось во время численного моделирования так, чтобы лучше соответствовать физическому эксперименту. При распространении учитывалось 496 пространственных мод с $n \leq 30$.

В качестве начальных данных для стоксовой волны использовалось разложение гауссова пучка радиуса 12 мкм на пространственные моды, причем для каждой моды задавалась случайная начальная фаза. Для волны накачки все моды изначально имели равные интенсивности и случайные фазы в соответствии с наблюдаемым в эксперименте параболическим профилем. Расчеты проводились для разных реализаций случайных фаз, а затем полученные выходные распределения волны накачки и стоксовой компоненты по модам усреднялись. Кроме того, на каждом шаге интегрирования члены, соответствующие ХРМ эффектам ($B_{p1,m1}^{P*}B_{p2,m2}^P$ в первом уравнении и $B_{p1,m1}^{S*}B_{p2,m2}^S$ во втором), заменялись на среднее значение по всем реализациям случайных фаз волны накачки и стоксовой компоненты.

При численных расчетах с помощью модели связанных мод рассматривалась многопроходная задача до установления выходного распределения стоксовой компоненты. При первом проходе для стоксовой волны на входе использовался описанный гауссов пучок. Для согласования с физическим экспериментом и для учета резонатора волоконной брэгговской решетки был добавлен выходной ответвитель 4%, фильтрующий фундаментальную моду на выходе волокна. Таким образом, после каждого прохода амплитуда основной моды стоксовой волны умножалась на $\sqrt{0.04}$ (что соответствует действию фильтра после кругового прохода), а остальные моды домножались на $\sqrt{0.004}$.

После этого полученный пучок использовался в качестве входных данных для стоксовой волны при следующем проходе. Для волны накачки каждый раз все моды инициализировались с одинаковыми интенсивностями и случайными фазами.

4. Полученные результаты

В работе численно исследовалась эволюция взаимодействия волны накачки и стоксовой компоненты при распространении по изогнутому многомодовому волокну с градиентным профилем показателя преломления выше порога ВКР-генерации. Для этого сперва были выполнены расчеты по распространению сигналов с использованием модели связанных мод для различных значений силы случайной связи и определено распределение мощности стоксова пучка по основным квантовым номерам n после установления (рисунок 1). Для каждого значения n выполнялось суммирование мощностей всех пространственных мод с тем же квантовым номером и усреднение по их степени вырожденности.

Как видно из рисунка, для малых значений силы линейной связи ($s = 2 \cdot 10^{-6}$) почти вся мощность сосредотачивается в фундаментальной моде с номером n = 0 благодаря нелинейным эффектам. По мере увеличения силы связи ($s = 6.8 \cdot 10^{-6}$) часть мощности стоксова пучка перераспределяется в моды высшего порядка, и распределение становится близким к экспоненциальному закону. Для больших значений силы случайной связи ($s = 2 \cdot 10^{-5}$) мощность выходного пучка разделяется равномерно между всеми пространственными модами, приближаясь к равномерному распределению, при этом в одной моде оказывается не более 3% мощности.

Далее было выбрано значение силы случайной линейной связи, которое наилучшим образом соответствует физическому эксперименту, основываясь на сравнении численных результатов с экспериментальными данными. На рисунке 2 представлено экспериментальное и численное распределение энергии стоксова пучка по номерам мод n при распространении значительно выше порога Рамана в изогнутом многомодовом волокне с градиентным профилем показателя преломления. Следует отметить, что результаты физического эксперимента (красные треугольники) были получены с использованием многомодового ВКР-лазера со структурой аналогичной той, что рассматривалась в численных экспериментах. Кроме того, была проведена аппроксимация результатов с помощью экспоненциального распределения вида $\alpha e^{-\beta n}$, где α и β — оптимизируемые параметры аппроксимации (зеленая пунктирная линия на рисунке 2).

Как можно заметить, наблюдается хорошее количественное согласие между экспериментальными и численными результатами. Это демонстрирует, что модель уравнений связанных мод со случайной линейной связью между соседними модами позволяет с высокой точностью описывать распространение волны накачки и стоксовой компоненты в изогнутом многомодовом волокне с градиентным профилем показателя преломления. Кроме того, распределение интенсивности, отсортированное по квантовым номерам n, можно довольно точно аппроксимировать с помощью экспоненциального распределения.

На рисунке 3 представлено распределение мощности по пространственным модам для стоксова пучка после установления при распространении значительно выше порога Рамана. Оно было получено численно с использованием модели уравнений связанных мод, включающей случайное линейное взаимодействие между соседними модами. Как видно, благодаря переносу энергии между модами, вызванному эффектами Керра и Рамана, а также случайным линейным взаимодействием, выходное распределение является симметричным относительно m = 0.

5. Иллюстрации, визуализация результатов.



Рис. 1: Выходное распределение энергии стоксова пучка по номерам мод n для различных значений силы линейной связи.



Рис. 2: Сравнение экспериментального и численного выходного распределения стоксова пучка по номерам мод для оптимальной силы линейной связи.



Рис. 3: Выходное распределение энергии стоксова пучка по пространственным модам для оптимальной силы линейной связи.

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Использование оборудования ИВЦ НГУ позволило провести численное моделирование распространения оптических пучков по многомодовому волокну с высокой скоростью благодаря использованию библиотеки MKL и запуску большого числа задач одновременно для получения хорошей статистики. Кроме того, было выполнено распараллеливание алгроритмов с помощью технологии MPI, что существенно сократило время выполнения расчетов.

7. Перечень публикаций, содержащих результаты работы.

- Sidelnikov O. S. et al. "Transverse mode distribution in multimode diode-pumped Raman fiber laser" // Journal of the Optical Society of America B. 2023. Vol. 40, No 12. P. 3269-3275. (Импактфактор: 1.8)
- 2. Сидельников О.С и др. "Численное моделирования процесса самоочистки стоксова пучка в изогнутом градиентном многомодовом волокне" // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. 2023. Т. 6, № 190. С. 443-444. (Импакт-фактор: 0.097)