

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЕХВОЛНОГО СМЕШЕНИЯ В ОПТОВОЛОКНЕ

Лытаев А. А.¹, Мирошниченко Г. П.¹

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, доцент Попов И. Ю.¹

¹Университет ИТМО
aleksandrlytaev@itmo.ru

Введение

Оптические волокна играют важную роль в современном мире, позволяя передавать большие объёмы данных на дальние расстояния, которые ранее были недоступны для других каналов коммуникации. В таких системах сигнал передаётся с помощью физических параметров оптических волн, распространяющихся в направленных модах оптического волокна. Вместе с тем, взаимодействие оптического излучения с материалом волновода приводит к медленному затуханию полезного сигнала, что становится существенным на больших расстояниях и поднимает вопрос о необходимости усиления полезного сигнала [1].

Использование оптических усилителей, которые работают на основе принципа индуцированного излучения и увеличивают мощность оптического сигнала без его преобразования в электрический, позволяет существенно удешевить и упростить процесс реализации оптоволоконных каналов. Наибольшее распространение в современном мире получили усилители на основе волокна, легированного ионами эрбия [1]. Также развиваются технологии усилителей, основанных на использовании рассеяния Рамана и полупроводников.

Главным недостатком описанных выше технологий является невозможность реализации фазочувствительного усиления, что накладывает фундаментальное ограничение на минимально возможный коэффициент шума в получаемом сигнале в 3 дБ. Параметрическое усиление на основе нелинейного оптического эффекта – четырехволнового смешения позволяет теоретически обойти этот предел, сведя коэффициент шума до 0 дБ [2].

Основной трудностью реализации данной технологии является необходимость точного фазового согласования между волнами, участвующими в процессе четырехволнового смешения. Одно из современных исследований в данной области показывают возможность получения коэффициента шума в размере 1.1 дБ при усилении в 25 дБ. Также данная реализация требует строгого задания разности фаз в 0.1 рад между волнами, участвующими в процессе, и накладывает жесткие ограничения в -160 дБ/Гц на относительный шум источника волны накачки [3].

Данное исследование ставит целью исследование возможности реализации фазочувствительного параметрического усиления с характеристиками, превосходящими полученные ранее с помощью математического моделирования данной системы.

Основная часть

На текущем этапе работы проведено моделирование процесса четырехволнового смешения монохроматических волн в оптическом волокне с высокой нелинейностью. Моделирование было реализовано путём решения системы дифференциальных уравнений для описания процесса четырехволнового смешения, полученных для огибающих волн из обобщённого уравнения Шредингера. Данные уравнения решаются с помощью метода Рунге-Кутте четвёртого порядка. Была получена зависимость коэффициента усиления сигнальной волны от фазовой расстройки между волнами, которая с высокой степенью точности совпадает с предсказанными теоретически в пределе неистощаемого источника. Результаты для монохроматических волн на

практике являются применимыми для лазерных импульсов длиной более 20 фс. В качестве физических параметров при моделировании были взяты данные для волокна OFS Standard Highly Non-Linear Optical Fiber.

Также была рассмотрена модель данного процесса с учётом обратного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна. Этот процесс происходит вследствие неупругого взаимодействия электромагнитной волны с термически возбуждёнными акустическими колебаниями среды и приводит к возбуждению сдвинутых по частоте электромагнитных волн, распространяющихся в обратном направлении. Для системы уравнений, учитывающих данный эффект, решение производится несколько раз с проходом в прямую и в обратную сторону, с целью нахождения начальных условий на компоненты Стокса, удовлетворяющих заданному уровню шумового возбуждения вследствие спонтанного рассеяния. Было получено, что учёт обратного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна в квазимонохроматическом приближении приводит к ограничению на максимальную мощность накачки в 30 мВт. Это ограничивает максимальное усиление, которое можно получить в данной схеме до 5 дБ, что является недостаточным для практического применения.

Выводы

В ходе численного моделирования было показано, что в то время, как процесс четырехволнового смешения при правильном согласовании фаз может неограниченно усиливать полезный сигнал, рассеяние Мандельштама — Бриллюэна существенно ограничивает мощность накачки до 30 мВт, а усиление до 5 дБ. Эти результаты явно показывают необходимость подавления рассеяния Мандельштама — Бриллюэна в исследуемых волокнах для реализации параметрического усиления с помощью различных техник, таких как температурный градиент вдоль волокна, а также использование более коротких импульсов с тем, чтобы ослабить накопление мощности компонентами Стокса и истощение мощности накачки. Впоследствии, планируется реализация численного моделирования систем, в которых происходит подавление рассеяния Мандельштама — Бриллюэна описанными выше способами.

Литература

1. Marhic M.E., Andrekson P.A., Petropoulos P., Radic S., Peucheret C., Jazayerifar M. Fiber optical parametric amplifiers in optical communication systems // *Laser & Photonics Reviews*. 2015. Vol. 9. P. 50–74.
2. Andrekson P.A., Karlsson M. Fiber-based phase-sensitive optical amplifiers and their applications // *Adv. Opt. Photon.* 2020. Vol. 12. P. 367–428.
3. Tong Z., Lundstrom C., Andrekson P. A., Karlsson M., Bogris A. Ultralow Noise, broadband phase-sensitive optical amplifiers, and their applications // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2012. Vol. 18, no. 2. P. 1016–1032.