

Новые аспекты нелинейной фотоники многомодовых волоконных систем

**М.Д. Гервазиев^{1,2,*}, Д.С. Харенко^{1,2}, А.А. Ревякин^{1,2}, А.Г. Кузнецов¹,
Е.В. Подivilов^{1,2}, Ф. Манджини³, М. Ферраро⁴, С. Вабниц^{2,3}, С.А. Бабин^{1,2}**

¹ *Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

³ *Университет Ла Сапиенца, Рим, Италия*

⁴ *Университет Калабрии, Ренде, Италия*

**E-mail: gervaziev.m@gmail.com*

DOI:10.31868/RFL.2024.73-74

Последнее десятилетие ознаменовалось резко возросшим количеством научных работ по исследованию нелинейных эффектов при распространении лазерного излучения в многомодовых (ММ) волокнах [1]. Актуальность темы не вызывает сомнений, в связи с тем, что многими исследователями ММ волокно воспринимается в качестве потенциального решения кризиса пропускной способности оптических линий связи. Помимо этого, гипотетическая возможность реализации полностью волоконного лазера на основе ММ световодов может открыть путь к созданию источников, которые сохраняли бы преимущества волоконных лазеров (компактность, эффективный теплоотвод и устойчивость к механическим воздействиям), позволяя при этом достигать мощностей, сравнимых с твердотельными системами [2], а также генерировать вихревые пучки. Однако, амбициозные цели неизбежно сопряжены с трудностями. В данном случае увеличение размерности пространства означает появление стохастической, нелинейной, коллективной модовой динамики. В связи с этим исследования пространственно-временной динамики при распространении излучения в ММ волокне сейчас крайне востребованы, и ключевым моментом в этом вопросе являются методы количественного анализа модового состава. Здесь себя прекрасно зарекомендовала модовая декомпозиция (МД) [3].

МД позволяет полностью экспериментально получить информацию об амплитудах и относительных фазах поперечных мод, формирующих пучок. Для этого используются методы цифровой голографии. Типичная схема эксперимента по модовому анализу состоит из волокна, в котором распространяется исследуемый пучок, пространственного модулятора света (spatial light modulator, SLM) и регистрирующего прибора, например КМОП камеры. На SLM воспроизводятся фазовые маски, которые представляют из себя корреляционные фильтры. При освещении такого фильтра исследуемым пучком и подстановке линзы после SLM в фокальной плоскости будет наблюдаться корреляционный отклик, регистрируемый камерой. Интенсивность в центре отклика пропорциональна вкладу моды, закодированной в фазовую маску. Таким образом, меняя фильтры, соответствующие каждой моде и, измеряя интенсивность в фокальной плоскости, можно получить модовый состав пучка. Измерив схожим образом межмодовые фазы, можно затем численно восстановить пучок для сравнения с оригиналом.

С помощью МД был исследован эффект керровской самоочистки [4]. Эффект был классифицирован как частный случай проявления установления равновесного состояния (термализации) ММ излучения в волокне с параболическим профилем показателя преломления (graded-index, GRIN) [5].

Термализация происходит в результате действия керровской нелинейности (Рис. 1а). Нелинейность в данном случае провоцирует эффективные процессы четырехволнового смешения, а, так как спектр мод в GRIN MM волокне эквидистантный, обмен энергией происходит одновременно между всеми модами. В результате модовый состав приобретает распределение, соответствующее обобщенной формуле Рэлея-Джинса, форма которого зависит исключительно от условий заведения.

Модификация метода МД позволяет определять вклад нескольких мод параллельно [6], уменьшая при этом время измерения на порядки. Это позволяет исследовать временную динамику модового состава различных систем, что и было сделано на примере волоконного ВКР лазера (Raman fiber laser, RFL). Нам удалось провести измерение амплитуд 10 мод стоксова пучка в режиме реального времени. Было обнаружено, что ~50% мощности сконцентрировано в фундаментальной моде, а интенсивность остальных мод снижается с увеличением радиального числа. Иными словами, вклад моды тем выше, чем выше плотность её пространственного распределения в центральной точке сердцевины. Флуктуации парциальных вкладов составляют ~20% на пороге генерации ВКР и снижаются до 10% при повышении мощности (Рис. 1б).

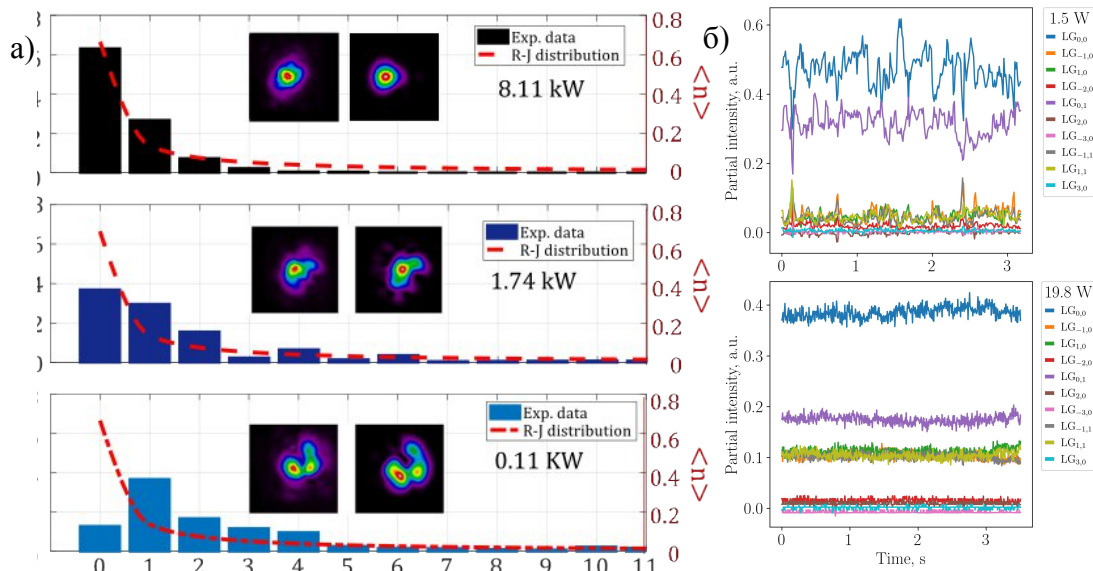


Рис. 1. Экспериментальные результаты, полученные с помощью МД, а) термализация пучка до возникновения эффекта самоочистки, б) временная модовая динамика в MM RFL.

Потенциал для совершенствования метода МД ещё далек от исчерпания. Добавление адаптивной экспозиции, анализ всего распределения корреляционного отклика вместо одной точки в центре, использование численно рассчитанных функций модуляции могут увеличить точность определения амплитуд и фаз. Вкупе с отдельно развивающимися методами возбуждения произвольных мод с помощью SLM в ближайшей перспективе можно получить систему контроля распределения поля на входе системы и детектирования – на выходе, что значительно расширит возможности для исследования нелинейной динамики MM волоконных систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 21-72-30024).

Литература

- [1] I. Cristiani, C. Lacava et al., *Journ. of Opt.* **24**, 083001 (2022)
- [2] L.G. Wright, D. N. Christodoulides, and F. W. Wise, *Science* **358**, 94-97 (2017)
- [3] M. D. Gervaziev, I. Zhdanov et al., *Las. Phys. Let.* **18**, 015101 (2020)
- [4] F. Mangini, M. D. Gervaziev et al., *Opt. Exp.*, **30**, 10850-10865 (2022)
- [5] E. V. Podivilov, F. Mangini et al., *Phys. Rev. Let.* **128**, 243901 (2022)
- [6] D. S. Kharenko, A. A. Revyakin et al., *Photonics* **10**, 1245 (2023)