

К теории квантовых флуктуаций в волоконных лазерах с синхронизацией мод

Ю.А. Мажирин*, Л.А. Мельников

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина

* E-mail: mazhirinayua@yandex.ru

DOI:10.31868/RFL.2024.24-25

Квантовые флуктуации излучения лазеров определяют их предельные характеристики (ширину линии излучения и уровень флуктуаций интенсивности), а также возможность их использования. Квантовая теория одночастотных лазеров хорошо известна [1], и предсказывает ширину линии генерации, статистику фотонов ниже и выше порога генерации. В то же время, большой интерес вызывают применения лазеров, генерирующих короткие световые импульсы за счет различных схем синхронизации продольных мод, и изучение квантовых флуктуаций в таких лазерах представляет собой важную задачу. В волоконных лазерах с синхронизацией мод, распространение световых импульсов имеет особенности, связанные с нелинейностью и дисперсией волокна, которые проявляются в квантовых флуктуациях распространяющихся импульсов [2], сжатии флуктуаций интенсивности и квантовой запутанности солитонных импульсов [3]. Квантовая запутанность является основой ряда протоколов для передачи информации [4] и квантовой сенсорики [5].

Критерий запутанности для световых импульсов может быть получен как информация Шмидта I - κ [6], которая выражается через параметр Шмидта $\kappa = \sum_i c_i^2$, где c_i – коэффициенты в разложении Шмидта:

$$|\Psi\rangle = \sum_{i=1}^n c_i |n_{1i}\rangle |n_{2i}\rangle$$

где $|\Psi\rangle$ – вектор состояния сложной системы, выражающийся как сумма произведений базисных векторов отдельных подсистем 1 и 2 с коэффициентами c_i удовлетворяющих условию нормировки $\sum_i c_i = 1$.

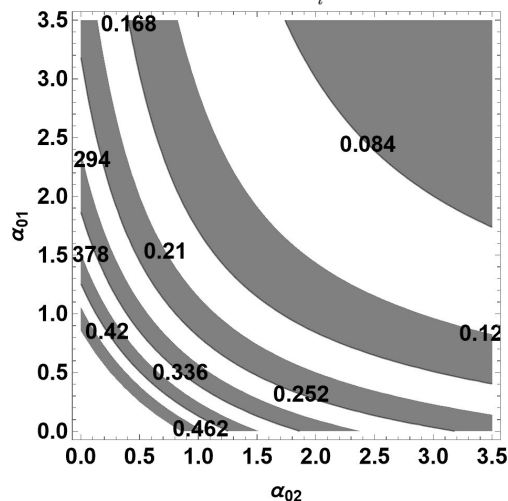


Рис1. Значения параметра Шмидта κ от параметров интенсивности двух солитонных импульсов, где $|\alpha_{1,2}|^2 = n_{1,2}$ – число квантов в импульсе, значения κ показаны на соответствующих кривых уровня.

$$\exp \left[-\left(1/4\right)n_1^2 x_{01} \Delta p_1 - \left(1/4\right)n_2^2 x_{02} \Delta p_2 \right]$$

Выражение для параметра Шмидта для случая непрерывных переменных сводится к интегралам по непрерывным переменным. Базисные функции для режима распространения в оптическом волокне двух солитонных импульсов и выражения для вектора состояния системы двух солитонов получены в [7], что позволяет определить информацию Шмидта в зависимости от параметров импульсов. Оказывается, что параметр Шмидта (Рис.1) на плоскости параметров интенсивности двух солитонных импульсов, где $|\alpha_{1,2}|^2 = n_{1,2}$ - число квантов в импульсе, достаточно мал (Рис.1), что связано с обрезающим множителем вида где $x_{01,02}$ - координаты импульсов, $n_{1,2}$ - число квантов в импульсах, $\Delta p_{1,2}$ - ширина спектров импульсов. Независимо от амплитуд импульсов и расстояния между ними композитное состояние соответствует квантовой запутанности импульсов, так как информация Шмидта обратно пропорциональна к. Из этого выражения следует, что отсутствие связи импульсов будет при расстоянии между ними $2x_{01}$, удовлетворяющим условию $n^2 x_{01} \Delta p \approx 0.6$.

Второй подход к изучению квантовых флуктуаций может быть выполнен с использованием динамической модели волоконного лазера, развитой в [8,9], и основанной на математическом методе переноса для расчета процесса распространения светового импульса в оптическом волокне. Для этого записываются динамические уравнения для квантово-механических операторов поля, с учетом затухания поля из-за излучения из активного резонатора, и соответствующего источника флуктуаций, необходимого для сохранения коммутатора. Динамическая модель включает уравнения для активной среды с соответствующими источниками флуктуаций и выражения, описывающие действия устройств сжатия импульса и дисперсии. В отсутствие флуктуаций отыскиваются режимы генерации регулярных последовательностей импульсов. Влияние источников флуктуаций рассматривается как малое возмущение к классическому полю в виде оператора, что позволяет рассчитать уровень флуктуаций выходного излучения лазера методом [10]. Эти результаты представлены в докладе.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ 22-12-00396.

Литература

- [1] Sargent III, M., Lamb W E, Jr, Scully M. O., *Laser Physics*, Addison Wesley, Reading, Mass. 464 p. 1974.
- [2] Haus H A. Electromagnetic noise and quantum optical measurements / H. Haus. *Advanced texts in physics*, ISSN 1439-2674, 2000, 557 p.
- [3] Mazhirina Yu. A., Melnikov L. A. *Laser Phys. Letters*, **17**, 015204 (2020).
- [4] Leuchs G, Silberhorn C, et al, Quantum Solitons in Optical Fibres: Basic Requisites for Experimental Quantum Communication. In: Braunstein, S. L., Pati, A. K. (eds) *Quantum Information with Continuous Variables*. Springer, Dordrecht, 379–421 (2003)
- [5] Lloid S, *arXiv:0803.2022v2 [quant-ph]*, 2008
- [6] Богданов А. Ю., Богданов Ю. И., Валиев К. А. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 15. Вычислительная математика и кибернетика. №1 (2007)
- [7] Lai Y and Haus H A *Phys. Rev.* **40** 854-66 (1989)
- [8] Мажирина Ю А и др. *Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика*, **22**, 73 (2014)
- [9] Мельников Л. А., Мажирина Ю. А., *Квантовая электроника*, **47**: в. 12 1083-1090 (2017), [*Quantum Electron.*, **47**: 12 (2017), 1083–1090]
- [10] Мельников Л. А., Мажирина Ю. А., *Квантовая электроника*, **49**: 12, 1083-1088 (2019)