

Квантовые флуктуации в волоконных лазерах

Л.А. Мельников,* Ю.А. Мажирина

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

*E-mail: lam-pels@ya.ru

DOI:10.31868/RFL2018.55-56

Исследования квантовых флуктуаций в лазерах имеют длительную историю и были связаны с вопросами о ширине линии излучения и статистики фотонов вблизи порога и в режиме развитой генерации, генерации сжатых состояний, субпуассоновской статистики, применением лазерных систем для метрологии, в частности, при определении фундаментальных ограничений на измерение угловой скорости в лазерных гироскопах, и лазерной спектроскопии. Теоретической основой данных исследований является нерелятивистская квантовая оптика, теоретические и практические результаты которой в настоящее время составляют основу квантовой информатики. Квантовые флуктуации становятся заметными при сравнительно небольшом числе квантов. Дисперсия пуассоновского распределения, соответствующего полностью когерентному состоянию поля в лазере равна среднему числу квантов n , то есть относительный уровень флуктуаций равен $1/\sqrt{n}$, причем при средней мощности одночастотного лазера в 1 мВт среднее число квантов в моде n порядка 10^8 . Квантовые флуктуации определяются процессами спонтанного излучения в моды резонатора активными атомами или ионами, нерезонансными потерями и тепловым излучением. Спонтанное комбинационное рассеяние и спонтанное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна является затравочным источником поля в ВКР или ВРМБ лазерах и его статистика имеет определенное влияние на выходной сигнал таких лазеров. Квантовые флуктуации связаны также с потерями в лазерах. Следует отметить, что при квазиклассическом описании поля в резонаторе для правильного описания процесса потерь необходимо вводить флуктуационные источники для амплитуды и фазу поля или квадратурной и синфазной компоненты (флуктуационно-диссипативная теорема). При квантовом описании поля такие флуктуации учитываются автоматически.

Длинные волоконные лазеры работают в режимах с большим числом продольных мод. Это означает, что при большом общем числе квантов их число в каждой моде может быть не слишком большим, и, следовательно, квантовые флуктуации в каждой моде могут быть заметными. Например для импульса длительностью в 1 пс на длине волны в 1.55 мкм и с энергией в несколько пДж (1.67 пДж для фундаментального солитона в волокне с аномальной дисперсией $35 \text{ пс}^2 \text{ км}^{-1}$) в волокне с длиной около 3 км полное число квантов примерно $1.3 \cdot 10^7$. При этом число мод поля $1.5 \cdot 10^5$, что дает менее 100 квантов на моду. Для более длинных резонаторов число квантов на моду может быть сравнимым с единицей. Такие состояния описываются суперпозицией произведений фоковских состояний, соответствующих отдельным модам поля. Взаимодействие мод обычно приводит к антикорреляции флуктуаций, и суммарный уровень флуктуаций ниже флуктуаций отдельных мод. Модовые корреляции могут приводить к появлению несепарабельных (запутанных) состояний в длинных волоконных лазерах. Волоконные лазеры сверхкоротких импульсов также могут иметь небольшое число квантов на одну продольную моду. Известно, что взаимодействие солитонных импульсов в нелинейном волокне приводит к появлению запутанных состояний [1], или, при распаде двухсолитонных

импульсов на два связанных через нелинейное взаимодействие [2], что является аналогом запутанных состояний в классическом смысле. Аналогично, импульсы излучения синхронизированных мод в волоконных лазерах также обладаю соответствующими свойствами, которые можно использовать для уплотнения информационных потоков [3]. В волоконных лазерах сверхкоротких импульсов возможны также и другие сложные режимы работы, соответствующие взаимодействующим солитонам [4].

В настоящей работе представлены результаты расчетов флуктуационных источников для длинного волоконного ВКР лазера с большим числом продольных мод. Для операторов комплексных огибающих полей встречных волн использовались уравнения типа переноса в отсутствие дисперсии групповой скорости. Соответственно, вид выражений, описывающих флуктуационные вклады должен соответствовать уравнениям переноса. Уравнения для средних интенсивностей полей численно решались с применением upwind схемы; в дальнейшем эти решения использовались для решения линейных уравнений для флуктуационных компонент. Источники флуктуаций выбирались так, чтобы выполнялись правильные коммутационные соотношения для операторов полей. Представлены корреляционные соотношения для различных продольных мод полей встречных волн и зависимости флуктуаций мощности и фазы поля от параметров лазера (уровня накачки, длины резонатора). Обсуждаются особенности, возникающие при появлении нестационарных режимов генерации в беззеркальном лазере и кольцевом лазере.

Обсуждается также адаптация метода backward propagation [5] для описания динамики флуктуационной части полей встречных волн в лазере, генерирующим солитонные импульсы.

Работа поддержана грантом РФФИ 17-12-01564.

Литература

- [1] R.-K. Lee, Y. Lai et al, *Phys. Rev.* **A70**, 063817 (2004)
- [2] L.A. Melnikov, Yu.A. Mazhirina *Quantum Electronics*, **47** 1083-1090 (2017)
- [3] Z. Xie, T. Zhong et al, *Nature Photonics* **9**, 536–542 (2015)
- [4] L. Gui, P.Wang et al, *Appl. Sci.* **8**, 201-232 (2018)
- [5] Y. Lai and S.-S. Yu, *Phys. Rev.* **A51**, 817 (1995).