УДК 535

СЛОЖНЫЕ СЕТИ ДЛЯ СЛУЧАЙНЫХ ЛАЗЕРОВ И ФОТОННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Захаренко П. В.[1], Царёв Д. В.[1]
Научный руководитель – доктор физ-мат. наук, Алоджанц А. П.[1]
[1]Университет ИТМО
p.zaxarencko2015@yandex.ru

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, научно-исследовательский проект № 075-03-2025-448.

Введение

Случайные лазеры представляют собой системы, в которых селекция мод и обратная связь формируются за счёт многократного рассеяния света в неупорядоченной активной среде без использования внешнего резонатора [1]. В работе [2] исследуется случайный лазер, реализованный на безмасштабной фотонной сети с диссипативным туннелированием фотонов между микрорезонаторами, содержащими двухуровневые квантовые системы. Особое внимание уделено влиянию топологии сети на спектральные свойства и порог генерации, а также установлена связь таких систем с фотонными машинами Изинга.

Основная часть

Модель системы строится в рамках формализма Горини–Коссаковского–Сударашана–Линдблада, который описывает когерентную и диссипативную динамику фотонной сети. Спектр линейных операторов $\hat{A}$ и $\widehat{M}$, в усреднённой модели, определяет условия генерации коллективных мод в фотонной сети [2]. Получены уравнения среднего поля типа Максвелла–Блоха для амплитуд фотонного поля, поляризации и инверсии населённостей.

Показано существование двух режимов генерации. Первый режим не зависит от параметра туннелирования и возникает, когда стационарная частота n-й моды резонансна с переходом двухуровневой системы. Этот режим напоминает генерацию в несвязанных микрорезонаторах и зависит от инверсии населённости [2]. Второй режим обусловлен диссипативным туннелированием и позволяет реализовать генерацию нерезонансных мод даже при исчезающе малой инверсии населённостей благодаря перераспределению энергии по сети. В последнем случае интерференционные эффекты вдоль путей графа приводят к зависящим от узла частотным сдвигам и передаче фотонов типа Хатано–Нельсона [3].

Показано наличие изолированного Перроновского собственного значения, определяемого статистическими характеристиками безмасштабной сети, а также наклон спектра в комплексной плоскости, задаваемый отношением мнимой и действительной частей коэффициента туннелирования [2]. Для анализа масштабируемых свойств фотонных мод в сети предложен подход ренормализационной группы. Он основан на предположении, что распределение поля по узлам может обладать самоподобной структурой. Здесь вводятся масштабные коэффициенты, связывающие локальное поле с усреднённым полем по сети. Анализ их среднего значения и дисперсии позволяет выявить свойства мод и определить, сохраняется ли форма распределения поля при переходе между масштабами или нет.

Минимизация функции потерь приводит к гамильтониану типа Изинга с матрицей связности сети, что реализует принцип минимума диссипации энергии, сформулированный Онсагером [4], и открывает возможность использования случайных лазеров в задачах фотонных вычислений [2].

Выводы

Показано, что топология безмасштабной фотонной сети влияет на спектральные характеристики и порог генерации случайного лазера. Диссипативное туннелирование изменяет распределение собственных частот и приводит к появлению дополнительного режима генерации, допускающего возбуждение нерезонансных мод при почти исчезающей инверсии населённостей за счёт перераспределения энергии по сети. Наличие Перроновского собственного значения определяются статистическими параметрами сети, и предложенный ренормгрупповой подход позволяет описать масштабные свойства фотонных мод. Такие модели фотонных сетей с диссипацией и накачкой открывают новые возможности для создания энергоэффективных лазеров. Их изучение важно для развития оптической обработки информации и аналоговых методов решения NP-трудных задач.

Литература

1. Wiersma D. S. The physics and applications of random lasers // Nature Physics. 2008. Vol. 4. P. 359–367. https://doi.org/10.1038/nphys971.
2. Tsarev D. V., Zakharenko P. V., Alodjants A. P. Complex networks for random lasers and photonic computing // Physical Review A. 2025. Vol. 112. P. 033508. https://doi.org/10.1103/1mqj-61yh.
3. Hatano N., Nelson D. R. Localization transitions in non-Hermitian quantum mechanics // Physical Review Letters. 1996. Vol. 77. P. 570–573. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.570.
4. Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes // Physical Review. 1931. Vol. 37. P. 405–426. https://doi.org/10.1103/PhysRev.37.405.