

КВАНТОВЫЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЕТЕВОМ МАТЕРИАЛЕ В РЕЖИМЕ СВЕРХСИЛЬНОЙ СВЯЗИ**Захаренко П.В. (ИТМО), Царёв Д.В. (ИТМО)****Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Алоджанц А.П. (ИТМО)**

Введение. В работе исследуются эффекты случайной и сверхизлучающей лазерной генерации в двумерном метаматериале со сложной сетевой структурой в режиме сверхсильной связи. Случайные лазеры являются одним из самых впечатляющих результатов современных исследований формирования макроскопической когерентности в результате случайного рассеяния света в неупорядоченной оптически активной среде. В таких устройствах селекция мод и обратная связь определяются рассеянием излучения в среде в отсутствие внешнего резонатора [1]. Другим важным эффектом, который можно наблюдать без лазерного резонатора, является сверхизлучение. Физически это явление возникает из-за установления квантовых корреляций между ансамблем двухуровневой системы (ДУС) посредством коллективного взаимодействия с квантованным электромагнитным (ЭМ) полем [2].

Основная часть. В исследовании решающее значение имеют свойства сети, определяющие как порог генерации, так и переход между случайным и сверхизлучающим режимами генерации. В работе рассматривается класс сетей, описываемых степенным распределением степеней (СРСУ) [3]. Ключевым параметром СРСУ сети является параметр средней степени узла $\langle k \rangle$, который указывает на среднее количество соединений, доступных произвольно выбранному узлу сети. В то же время второй момент распределения степеней $\langle k^2 \rangle$ отвечает за наличие и размер хабов – узлов, чья степень $k_i \gg \langle k \rangle$. Две эти характеристики полностью описывают статистические свойства сети. В каждом узле такой сети размещена двухуровневая система (ДУС), которая может находиться в основном и возбужденном состоянии. ДУС взаимодействуют с квантованным электромагнитным (ЭМ) полем посредством набора волноводов, которые представляют собой ребра графа.

В предыдущих работах [3] данная система исследовалась в приближении вращающейся волны. При этом использовался гамильтониан типа Дике, учитывающий многомодовый характер взаимодействия вещества и поля, однако антирезонансное слагаемое отбрасывалось. В данной работе этот подход был уточнен за пределами приближения вращающейся волны, с помощью специально подобранных унитарных преобразований оригинального гамильтониана, см. подробнее [4].

Через подход Горини–Коссаковского–Сударшана–Линдблада (ГКСЛ) были получены уравнения динамики амплитуд фотонного поля в узлах сети, поляризации ДУС и инверсии населенностей системы. Был определен фазовый сдвиг Блоха-Зигерта, а также параметр сетевой кооперативности. С помощью данных параметров были исследованы случайный и сверхизлучающий режимы лазера на основе сетевого материала, а также ключевые характеристики перехода из одного режима в другой. Показано, что эти параметры зависят от конфигурации сети и могут быть существенно усилены с достижением режима сверхсильной связи свет-вещество.

Выводы. Был исследован режим сверхсильной связи свет-вещество в сетевом квантовом материале, состоящем из ДУС, взаимодействующих с электромагнитным полем внутри некоторой фотонной сети. Заданы малые углы поворота унитарных преобразований, чтобы учесть антирезонансные слагаемые из исходного гамильтониана за пределом вращающейся волны. Получены уравнения среднего поля типа Максвелла-Блоха; показано, что накопленный фазовый сдвиг фотонного поля имеет комплексную структуру. При малом эффективном параметре связи свет-вещество полная фаза характеризуется нелинейным (керровским) сдвигом Блоха-Зигерта, который можно усилить и настроить с помощью соответствующей

сетевой архитектуры, описываемой средней степенью $\langle k \rangle$.

Список использованных источников:

1. Wiersma D. S., Diederik S. The physics and applications of random lasers // Nature physics. – 2008. – Т. 4. – №. 5. – С. 359-367.
2. Meiser D., Meystre P. Superstrong coupling regime of cavity quantum electrodynamics // Physical Review A. – 2006. – Т. 74. – №. 6. – С. 065801.
3. Alodjants A. et al. Random Lasers as Social Processes Simulators // Entropy. – 2023. – Т. 25. – №. 12. – С. 1601.
4. Zacharenko P. V. et al. Quantum metamaterials with complete graph interfaces in the ultrastrong coupling regime // Laser Physics Letters. – 2024. – Т. 21. – №. 11. – С. 115203.