

**СЛУЧАЙНЫЕ И СВЕРХИЗЛУЧАЮЩИЕ ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С СЕТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ****Захаренко П.В. (ИТМО), Царёв Д.В. (ИТМО), Никитина М.М. (ИТМО),  
Алоджанц А.П. (ИТМО)****Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Алоджанц А.П.  
(ИТМО)**

**Введение.** Предложены новые квантовые источники света на основе двумерных сетевых материалов, подчиняющихся степенному закону распределения степеней. Этими источниками являются случайный (А-класс) лазер и сверхизлучающий (D-класс). Мы вводим новый параметр сетевой кооперативности и обосновываем его для взаимодействия квантовых двухуровневых систем, размещенных в узлах сети, с лазерным облучением. Мы показываем, что в таких средах коллективные эффекты могут сильно усиливаться в квантовой области.

**Основная часть.** Ключевым моментом исследования являются 2D-материалы с сетевой структурой. Было показано, что такие материалы представляют собой удобную платформу для изучения явления сверхизлучения [1], а также для реализации случайного [2] и сверхизлучательного лазеров [3]. При этом свойства сетей определяют как порог генерации, так и переход между случайным и сверхизлучательным режимами генерации.

Мы фокусируемся на конкретном классе сетей, описываемых степенным распределением степеней (СРСУ), см. [4] (количество узлов  $N \gg 1$ ). Современные квантовые технологии предоставляют множество возможностей для реализации 2D-материалов с сетевым интерфейсом. Например, можно рассмотреть сеть, содержащую в узлах микрорезонаторы с квантовыми точками [2], либо можно использовать двухуровневые атомы, захваченные на поверхности 2D-структуры эффектом Казимира-Польдера, приводящим к притяжению силы Ван-дер-Ваальса, см. [5]. При этом мы можем широко варьировать материальные параметры сетей двухуровневой системы (ДУС) в зависимости от конкретной реализации.

Рассмотрим лазер, изготовленный из двумерного материала с сетевой структурой. Пусть в каждом узле этой сети размещена ДУС, которая может находиться в основном  $|g\rangle_i$  или возбужденном  $|e\rangle_i$  состоянии. Эти ДУС взаимодействуют с квантованным электромагнитным полем (ЭМ) через набор волноводов, представляющих собой ребра графа материальной сети; это ЭМ поле мы описываем операторами уничтожения (рождения)  $\hat{a}_j$  ( $\hat{a}_j^\dagger$ ). Записав гамильтониан такой системы в формализме вторичного квантования, применив подход Горини–Коссаковского–Сударшана–Линдблада в рамках приближения вращающейся волны, можно получить три уравнения динамики для среднего поля  $E$ , поляризации системы  $J_-$  и разности населенностей  $D$ , см. подробнее в [3]).

Полученные уравнения динамики были исследованы в двух пределах, соответствующих двум классам лазеров. Первый предел предполагает наличие эффективного резонатора, образуемого сетью в режиме андерсоновской локализации [3], этот предел соответствует случайным лазерам или лазерам А-класса. В таком случае поле  $E$  представляет собой вещественную величину, а поляризацию и разность населенностей можно положить постоянными и исключить их из рассмотрения, получив известное уравнение лазера.

С другой стороны, в т.н. пределе плохого резонатора уже поляризация  $J_-$  является вещественной величиной, для которой может быть получено уравнение лазера – это предел сверхизлучательного лазера, которому соответствует D-класс. При этом поле  $E$  представляет собой малую, но не нулевую величину; это слабое поле фотонов обеспечивает спонтанную синхронизацию диполей ДУС, и получаем уравнения.

Важным результатом исследования являются так называемые параметры сетевой кооперации, впервые введенные для исследуемой среды. Эти параметры определяют

ключевые характеристики фазовых переходов в случайном и сверхизлучательном лазерах. При этом параметры зависят от конфигурации сети и могут быть существенно усилены в т.н. аномальном режиме сети.

**Выводы.** В работе предложена модель двумерного квантового материала с сетевой архитектурой. Модель исследована в двух пределах, позволяющих реализовать случайный (A-класс) и сверхизлучательный (D-класс) лазеры. В обоих пределах исследованы неравновесные фазовые переходы, изучена роль сетевой кооперации ДУС. Показано, что коллективные эффекты могут быть сильно усилены в средах с сетевой структурой, что открывает новые перспективы в реализации случайных и сверхизлучающих лазеров.

#### **Список использованных источников:**

1. Баженов А. Ю., Никитина М. М., Алоджанц А. П. Сверхизлучательный фазовый переход в микроструктурах с комплексной сетевой архитектурой // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 115. – №. 11. – С. 685-691
2. Баженов А. Ю. и др. Случайный лазер на основе материалов в виде сложных сетевых структур // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 117. – №. 11. – С. 819-825
3. Alodjants A. et al. Random Lasers as Social Processes Simulators // Entropy. – 2023. – Т. 25. – №. 12. – С. 1601.
4. Zhou B., Meng X., Stanley H. E. Power-law distribution of degree–degree distance: A better representation of the scale-free property of complex networks // Proceedings of the national academy of sciences. – 2020. – Т. 117. – №. 26. – С. 14812-14818.
5. Yu S. P. et al. Two-dimensional photonic crystals for engineering atom–light interactions // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2019. – Т. 116. – №. 26. – С. 12743-12751.