

## ДЕСТАБИЛИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ СОСТОЯНИЙ ВАННЬЕ — ШТАРКА В ЦЕПОЧКЕ СВЯЗАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ С КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ \*

✉ А. В. Вербицкий, А. В. Юлин

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

✉ alexey.verbitskiy@metalab.ifmo.ru

Состояния Ваннье — Штарка (ВШ), первоначально обнаруженные в физике твердого тела, были также продемонстрированы и в других физических системах, где продолжают активно исследоваться, например [1–3]. Данные состояния представляют собой локализованные моды в периодической структуре и могут наблюдаться в оптических системах [4]. Широко известное явление блоховских колебаний (БК), имеющих вид «змеевидных» траекторий, является суперпозицией состояний ВШ [5].

С экспериментальной точки зрения исследование состояний ВШ и БК является сложной задачей, однако оптические системы имеют преимущество в данном вопросе. Это открывает возможность для описанных явлений найти свое практическое применение в оптических устройствах, в частности в поляритонном лазере. Состояния ВШ наиболее изучены в консервативных системах, однако введение малой диссипации может позволить использовать данные состояния и в активных системах, состоящих, например, из массивов микролазеров.

Недавно в исследовании [6], посвященном изучению активной оптической системы (массив взаимодействующих резонаторов с пространственно неоднородным усилением поля) с собственными модами в виде состояний ВШ, было показано, что в таких системах можно добиться одномодовой лазерной генерации. Преимуществом такой лазерной системы является то, что состояния ВШ могут быть пространственно широкими (таким образом, область локализации моды ВШ содержит большое количество резонаторов), что позволяет увеличить суммарную мощность выходного излучения. Кроме того, в данной системе частотой излучения можно управлять путем геометрического смещения пятна накачки, поскольку в этом случае можно осуществить переключение с одного состояния ВШ на другое.

Однако в работе [6] использовалось приближение, не учитывающее эффект нелинейного сдвига собственных частот резонаторов (из-за керровской нелинейности). С другой стороны, известно, что мгновенная керровская нелинейность существенно влияет на устойчивость состояний. Целью настоящей работы является рассмотрение влияния керровской нелинейности на генерацию состояния ВШ в системе связанных оптических резонаторов.

Для описания динамики массива взаимодействующих нелинейных резонаторов было использовано обобщенное дискретное нелинейное уравнение Шрёдингера, описывающее эволюцию медленно меняющихся амплитуд  $U_n(t)$  мод отдельных резонаторов:

$$i\partial_t U_n + \sigma(U_{n+1} + U_{n-1}) + \mu n U_n + \alpha |U_n|^2 U_n + i\gamma_n U_n + i\beta_n |U_n|^2 U_n = 0,$$

где  $n$  — нумерация резонаторов,  $\sigma$  — сила связи между соседними резонаторами,  $\mu$  характеризует крутизну линейной зависимости собственных частот резонаторов от их номера,  $\alpha$  — коэффициент керровской нелинейности,  $\gamma_n$  — линейные потери. Мы также учитываем, что потери

\* Исследование выполнено при поддержке программы «Приоритет-2030».

© А. В. Вербицкий, А. В. Юлин, 2024

в резонаторах являются функцией интенсивности поля (т. е. в системе присутствуют нелинейные потери), которая в простейшем случае аппроксимируется кубической зависимостью, где  $\beta_{nl}$  определяет величину нелинейных потерь.

Как было показано в статье [6], в системе связанных оптических резонаторов без керровской нелинейности возможны различные режимы генерации состояний ВШ. В нашей работе было продемонстрировано, что наличие керровской нелинейности влияет на области существования этих режимов в пространстве параметров. В частности, были рассмотрены одночастотный режим, соответствующий возбуждению одного состояния ВШ, и многочастотный режим, чья динамика аналогична незатухающим БК.

С помощью численного моделирования было обнаружено, что керровская нелинейность, влияющая на собственные частоты резонаторов, может играть определяющую роль при переходе от одночастотного к многочастотному режиму. Чтобы объяснить этот эффект, была поставлена спектральная задача для исследования устойчивости состояний ВШ, которая решалась численно. Решение спектральной задачи показало, что переключение режима генерации происходит из-за неустойчивости, приводящей к возбуждению новых состояний ВШ.

Для понимания механизма дестабилизации одночастотного режима мы разработали аналитический подход, основанный на теории возмущений. Проведенный анализ показал, что неустойчивость возникает из-за параметрического возбуждения мод с номерами  $l = m \pm k$ . При этом моды с  $k = \pm 1$  имеют наибольшую скорость роста, поэтому колебания возникают на частотах, отстроенных на характерную величину  $\mu$  (разность частот между соседними резонаторами) от частоты первоначально возбужденного состояния.

Таким образом, мы численно и аналитически исследовали динамику и устойчивость оптических состояний ВШ в резонаторной системе с диссипацией и нелинейностью. Полученные нами результаты представляются перспективными для дальнейших фундаментальных исследований и потенциально могут быть использованы для достижения стабильной монохроматической генерации в массивах микролазеров.

### Литература

1. Aepli A., Chu A., Bothwell T. et al. Hamiltonian engineering of spin-orbit-coupled fermions in a Wannier-Stark optical lattice clock // *Science Advances*. 2022. Vol. 8 (41). P. eadc9242.
2. Berghoff D., Bühler J., Bonn M. et al. Low-field onset of Wannier-Stark localization in a polycrystalline hybrid organic inorganic perovskite // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12 (1). P. 5719.
3. Wetter H., Fedorova Z., Linden S. Observation of the Wannier-Stark ladder in plasmonic waveguide arrays // *Optics Letters*. 2022. Vol. 47 (12). P. 3091–3094.
4. Sterke de C. M., Bright J.N., Krug P.A., Hammon T.E. Observation of an optical Wannier-Stark ladder // *Phys. Rev.* 1998. Vol. 57 (2). P. 2365.
5. Beierlein J., Egorov O.A., Harder T.H. et al. Bloch Oscillations of Hybrid Light-Matter Particles in a Waveguide Array // *Adv. Opt. Mater.* 2021. Vol. 9. P. 2100126.
6. Verbitskiy A., Yulin A. Excitation of Wannier-Stark states in a chain of coupled optical resonators with linear gain and nonlinear losses // *JETP*. 2024. Vol. 138 (4). P. 455–459.