Стриженко Сергій Сергійович «Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів».

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» – Інститут фізики Національної Академії Наук України. – Київ, 2022.

Анотація

У дисертаційній роботі представлені результати досліджень кількох джерел квантового світла на основі багаторівневих атомів.

По-перше, експериментально реалізовано та чисельно змодельовано джерело біфотонів на основі резонансної чотирихвильової взаємодії з використанням чотирьох рівнів рубідію-87 — двох надтонких рівнів основного стану та двох збуджених рівнів тонкої структури. Чисельне моделювання ґрунтується на описі взаємодії лазерного світла з речовиною в одновимірному оптично товстому середовищі з подвійним заломленням, що використовує формалізм матриці густини та наближення *rotating wave approximation* та *Weißkopf-Wigner approximation*. Такий підхід дозволив відтворити взаємодію багаторівневих атомів із урахуванням магнітних підрівнів кожного рівня зі світлом будь-якої поляризації та визначити просторовий розподіл і часову еволюцію як квантового стану атомів, так і комплексних амплітуд полів. Для забезпечення можливості проведення чисельного моделювання протягом реалістичного часу за використанням звичайних персональних комп'ютерів програму було оптимізовано методом напіввекторизації. Незважаючи на те, що при чисельному моделюванні використано напівкласичне наближення, за його допомогою визначено поляризаційні характеристики однофотонних полів у джерелі біфотонів на основі чотирихвильової взаємодії.

По-друге, розроблену методику використано для чисельного моделювання квантового за природою явища раманівської суперфлуоресценції в трирівневій схемі в просторово неоднорідному середовищі. Її результати було використано для розробки експериментальної схеми спостереження явища раманівської суперфлуоресценції в порожнистих світловодах, що заповнені холодними атомами рубідію-87. Результати експериментальних досліджень кількісно і якісно описуються чисельним експериментом. Запропоновано просту модель явища суперфлуоресценції в неоднорідних середовищах, яка ґрунтується на концепції ефективного числа атомів, задіяних у колективному випромінюванні і пояснює всі особливості цього явища.

По-третє, теоретично досліджено джерело одиночних фотонів на основі нерезонансної схеми з трирівневим атомом у одномодовому резонаторі, що складається з одного ідеального дзеркала та одного напівпрозорого. Розвинуто теорію взаємодії такого резонатора з напівнескінченним

одновимірним середовищем, і на її основі показано, що така схема дозволяє простим способом створювати фотон бажаної хвильової форми за вимогою. Це досягається в певному режимі взаємодії, який забезпечує створення фотона без заселення квантового стану резонатора.

Ключові слова: джерела квантового світла, багаторівневі атоми, джерела біфотонів, подвійне заломлення, поляризоване світло, чотирихвильова взаємодія, суперфлуоресценція.

Abstract

The thesis presents results of experimental, theoretical, and numerical research of several quantum light sources based on multi-level atoms.

Firstly, we experimentally implemented and numerically simulated a source of biphotons based on resonant four-wave mixing. The source utilizes four levels of rubidium-87, including two hyperfine levels of the ground state and two excited levels of the fine structure. The numerical simulation, based on the equations describing the interaction between laser light and matter in a one-dimensional medium of high optical depth and high birefringence, employs the density matrix formalism and rotating wave and Weißkopf-Wigner approximations. This approach accurately reproduces interaction between multi-level atoms and light, considering degeneracy by the magnetic quantum number. To enable realistic time simulations on conventional personal computers, the simulation was optimized using the half-vectorization method. Despite utilizing semi-classical approximation, the simulation allowed to determine polarization of the one-photon field generated by the source of biphotons.

Secondly, the proposed simulation was also used to numerically model Raman superfluorescence in a three-level scheme within a spatially inhomogeneous medium. The simulation results were utilized to design an experimental setup for researching Raman superfluorescence in hollow waveguides filled with laser-cooled atoms of rubidium-87. The obtained results aligned both qualitatively and quantitatively with experimental data. Following the experiments and numerical simulations, a simple theoretical model of superfluorescence in inhomogeneous media was proposed. This model relies on the concept of maximal number of atoms collectively participating in the initial superfluorescent burst, providing an explanation for all observed properties of the phenomenon.

Finally, the thesis delves into the theoretical exploration of a single-photon source consisting of a single three-level atom coupled to a single-mode cavity, where one mirror is semi-transparent. A theory describing the interaction between this source and a semi-infinite one-dimensional bath was developed. This theory demonstrated that, under specific regime of interaction where quantum state of the caviy is unpopulated, the source can produce a photon of desired shape on demand.

Keywords: sources of quantum light, multi-level atoms, sources of biphotons, birefringence, polarized light, four-wave mixing, superfluorescence

Список публікацій автора дисертації за її темою

Статті у періодичних наукових виданнях

[1]A. Bruns, C.-Y. Hsu, S. Stryzhenko, E. Giese, L. P. Yatsenko, I. A. Yu, T. Halfmann, and T. Peters, "Ultrabright and narrowband intra-fiber biphoton source at ultralow pump power", Quantum Science and Technology **8**, 015002 (2022).

[2]A. Saharyan, B. Rousseaux, Z. Kis, S. Stryzhenko, and S. Guérin, "Propagating single photons from an open cavity: description from universal quantization", Phys. Rev. Res. **5**, 033056 (2023).

[3]S. Stryzhenko, A. Bruns, and T. Peters, *N Scaling of large-sample collective decay in inhomogeneous ensembles*, submited to Phys. Rev. Res., 2023, arXiv:2307 . 11623 [quant-ph].

Виступи на наукових конференціях

[1]S. Stryzhenko, "Four-wave mixing with Rubidium-87 in a hollow-core fiber", in LIM- QUET conference (Sept. 19–23, 2021).

[2]A. Bruns, C.-Y. Hsu, S. Stryzhenko, E. Giese, L. Yatsenko, I. A. Yu, T. Halfmann, and T. Peters, "Narrowband biphoton source of maximal spectral brightness at ultralow pump power", in The 27th International Conference on Atomic Physics (July 17–22, 2022), p. 313.

[3]A. Bruns, C.-Y. Hsu, S. Stryzhenko, E. Giese, L. Yatsenko, I. Yu, T. Halfmann, and T. Peters, "Ultrabright and narrowband intra-fiber biphoton source at ultralow pump power", in DPG-Frühjahrstagung 2023, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, edited by B. Nunner (Mar. 5–10, 2023), p. 150.

[4]S. Stryzhenko, "Numerical research of coherent interaction between laser light of arbitrary polarization and atoms of a complex level structure with resolved hyperfine structure", in Resonance phenomena in atomic systems (Sept. 19–21, 2023).

Особистий внесок автора дисертації

Автор дисертації спільно з науковим керівником розробив, самостійно оптимізував і запрограмував мовою Python чисельну модель взаємодії багаторівневих атомів із полем довільної поляризації та використав її для супроводу експериментів зі створення джерела біфотонів та дослідження раманівської суперфлуоресценції. Разом із науковою групою Інституту прикладної фізики

Технічного університету Дармштадта автор брав участь у постановці та теоретичному супроводі цих експериментів, в обробці отриманих даних та їх аналізі, в обговоренні отриманих результатів і в підготовці публікацій до друку. Під час проведення теоретичних досліджень одноатомного джерела одиночних фотонів спільно з науковою групою Міждисциплінарної лабораторії Карно Університету Бургундії автор брав участь у розробці теорії взаємодії трирівнених атомів із резонатором, обговоренні та аналізі отриманих результатів і підготовці до друку статті.