

ГЕНЕРАЦІЯ КІЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ОПТИЧНОМУ ПІНЦЕТІ

Є. С. Бутакова^{1,2,a}, А. М. Негрійко^{1,2}

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

² Інститут фізики НАН України

Анотація

Представлено результати розробки та експериментальної реалізації оптичної системи для генерації кільцевого (порожнистого) лазерного пучка, призначеного для оптичних пінцетів. Такий пучок характеризується мінімальною інтенсивністю вздовж осі та підвищеною інтенсивністю на периферії, що формує потенціальну яму в центрі та забезпечує стабільне утримання мікрочастинок.

У ході експерименту визначено поперечний розподіл інтенсивності лазерного випромінювання з довжинами хвиль 1064 нм та 532 нм шляхом сканування пучка з кроком 0.1 мм. Виявлений локальний мінімум у центрі підтверджує формування кільцевої структури та потенціальної ями.

Встановлено, що потужність наявних лазерних джерел є недостатньою для стабільного утримання частинок в оптичній пастці, що зумовлює необхідність використання потужнішого випромінювача, наприклад, аргонного лазера. Отримані результати можуть застосовуватися для оптимізації параметрів оптичних пасток і вдосконалення схем оптичного пінцета.

Ключові слова: оптичний пінцет; кільцевий пучок; порожнистий пучок; аксикон; розподіл інтенсивності; оптична пастка; лазерне випромінювання

Вступ

Оптичний пінцет є одним із найефективніших інструментів сучасної експериментальної фізики, що забезпечує безконтактне захоплення та маніпулювання мікро- і наночастинами за допомогою сфокусованого лазерного випромінювання [1]. Основи методу були закладені у роботах А. Ешкіна, який продемонстрував можливість утримання діелектричних частинок у фокусі лазерного пучка під дією градієнтних сил світлового тиску [2, 3]. Подальший розвиток цієї концепції призвів до створення високоточних оптичних пасток, які широко застосовуються у фізиці, біофізиці, матеріалознавстві та нанотехнологіях [4, 5].

Класичний оптичний пінцет використовує гаусовий лазерний пучок з максимумом інтенсивності у фокусі. Частинка утримується в області максимальної інтенсивності завдяки домінуванню градієнтної сили над силою розсіювання [6]. Однак для певних задач, зокрема під час маніпуляцій із поглинаючими або нестійкими частинками, така конфігурація має обмеження. Вона може спричинити нестабільність утримання та деградаційні ефекти взаємодії з інтенсивним світловим полем у центрі пучка [7, 8].

У зв'язку з цим останніми роками значну увагу приділяють використанню структурованих світлових полів, зокрема пучків із просторово неоднорідним розподілом інтенсивності.

Одним із найбільш перспективних напрямів є застосування порожнистих (кільцевих) пучків, у яких інтенсивність мінімізується вздовж осі та концентрується на периферії [9]. Така конфігурація сприяє формуванню потенціальної ями в області зниженої інтенсивності, що є визначальним для стабільного утримання частинок у центрі пучка.

Ефективним методом формування таких пучків є використання аксиконів (конічних лінз, які переломлюють світло під постійним кутом до осі), що перетворюють гаусів пучок на так звані Бесселеві або квазі-Бесселеві пучки з кільцевою структурою інтенсивності [10, 11]. У таких пучках енергія розподіляється вздовж кільця, що забезпечує підвищені градієнти інтенсивності на периферії та створює умови для формування стабільної тривимірної пастки. Крім того, аксиконні системи дозволяють отримувати відтворювані результати без використання фазових модуляторів.

Особливий інтерес становить використання подвійних аксиконних систем, які дозволяють точніше контролювати геометрію пучка, його діаметр, кут розходження та розподіл інтенсивності [12]. Такі системи забезпечують оптимізацію параметрів оптичної пастки відповідно до конкретних експериментальних умов.

Попри значний прогрес у галузі оптичних пінцетів,

^alzbutakova@gmail.com

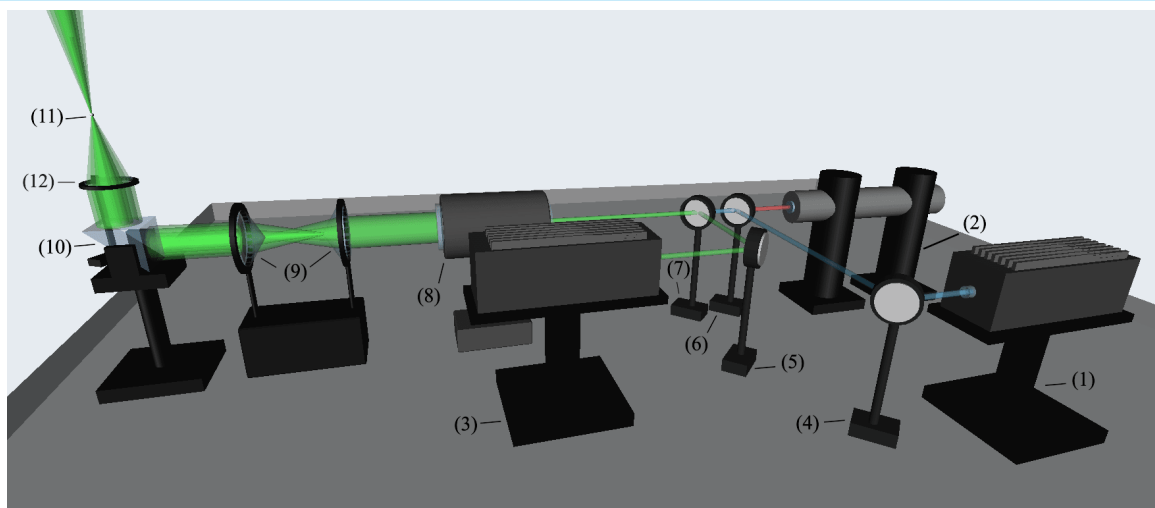


Рис. 1. Схематичне зображення експериментальної установки: (1) — діодний лазер ($\lambda = 450$ нм); (2) — He-Ne лазер ($\lambda = 1064$ нм); (3) — Nd:YAG лазер ($\lambda = 532$ нм); (4-7) — поворотні дзеркала; (8) — телескопічна система для розширення пучка; (9) — система з двох аксиконів; (10) — поворотна призма; (11) — фокусуєчий об'єктив; (12) — мікрочастинка, локалізована в оптичній пастці.

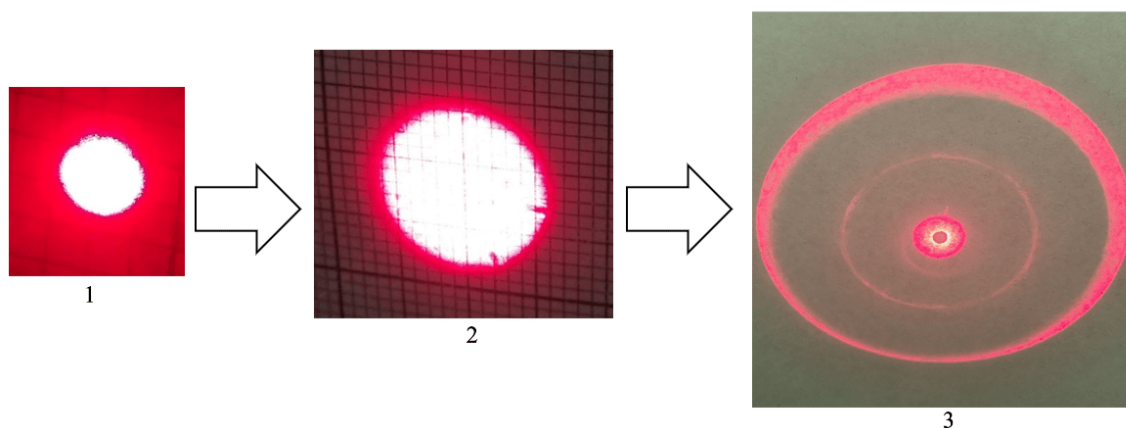


Рис. 2. Етапи трансформації лазерного пучка в оптичній системі: (1) вихідний гаусівський пучок; (2) розширення світлового пучка в телескопічній системі; (3) утворений кільцевий пучок

питання технічної реалізації стабільних пасток із заданими просторовими характеристиками пучка залишається актуальним. Це особливо важливо для задач, які потребують формування потенціальних ям з мінімальною інтенсивністю в центрі, що вимагає точного налаштування оптичної схеми та суворого контролю параметрів лазерного випромінювання.

Отже, актуальність дослідження полягає у необхідності розробки та оптимізації експериментальних схем оптичних пінцетів із використанням структурованих лазерних пучків, а також у дослідженні просторового розподілу інтенсивності кільцевих лазерних пучків.

1. Експериментальна установка

Для формування порожнистого (кільцевого) лазерного пучка створено експериментальну установку, призначену для утримання мікрочастинок в оптичному пінцеті (див. рис. 1). Основна концепція полягає у створенні розподілу інтенсивності з мінімумом

на оптичній осі, що забезпечує формування потенціальної ями для надійного захоплення поглинаючих частинок.

Оптична схема установки складається з таких ключових компонентів: лазерних джерел випромінювання, телескопічної системи, що розширює пучок, системи парних аксиконів для формування кільцевого розподілу поля, поворотної призми та фокусувального об'єктива.

У роботі використовувалися твердотільні лазери з довжинами хвиль 1064 нм, 532 нм та 450 нм.

1.1. Генерація кільцевого лазерного пучка

Вихідне лазерне випромінювання з поперечним перерізом кількох міліметрів спрямовували на телескопічну систему, яка забезпечувала розширення пучка (див. рис. 2). Це масштабування є необхідним для подальшого формування кільцевої структури, оскільки зменшує кутову розбіжність і забезпечує однорідний розподіл інтенсивності.

Основним елементом експериментальної установки є система з двох аксиконів, яка перетворює вихідний гаусівський пучок на порожнистий (кільцевий). Аксикон являє собою конічну лінзу, що модифікує хвильовий фронт випромінювання, спрямовуючи енергію від оптичної осі до периферії. У результаті формується світлове кільце з нульовою інтенсивністю у центрі.

Методи формування подібних світлових полів широко використовуються для оптичного маніпулювання. Кільцеві пучки забезпечують ефективну локалізацію мікрооб'єктів у центральній «темній» зоні, що є ключовим для надійного захоплення поглинальних частинок під впливом градієнтних сил.

1.2. Зміна напрямку поширення та фокусування лазерного пучка

Сформований кільцевий пучок спрямовується на поворотну призму, яка змінює напрям його поширення з горизонтального на вертикальний. Ця конфігурація оптимізує просторову геометрію експерименту та сприяє інтеграції оптичної схеми в систему візуалізації.

На завершальному етапі пучок проходить крізь фокусуючу лінзу, яка забезпечує високу концентрацію інтенсивності на периферії кільця та формує глибоку потенційну яму в його центрі. Така структура створює умови для стабільного оптичного захоплення мікрооб'єктів.

2. Результати та їх аналіз

2.1. Розподіл інтенсивності пучка

Проведено вимірювання поперечного розподілу інтенсивності для лазерів із довжинами хвиль 1064 нм і 532 нм. Кільцевий пучок сканували горизонтально шляхом переміщення діафрагми діаметром 0.9 мм із кроком 0.05 мм. Відповідні експериментальні залежності інтенсивності $I(x)$ наведено на рис. ??(regime1, regime2).

Аналіз отриманих профілів демонструє характерні ознаки кільцевої структури: чітко виражений локальний мінімум на оптичній осі та два симетричні максимуми на периферії. Такий розподіл інтенсивності є типовим для порожнистих пучків, сформованих за допомогою аксиконів, що узгоджується з результатами попередніх теоретичних та експериментальних досліджень.

Наявність зони мінімальної інтенсивності в центрі є визначальною умовою для формування стабільної оптичної потенціальної ями. На відміну від класичних гаусових пучків, така конфігурація поля дозволяє ефективно локалізувати поглинальні мікрочастинки, запобігаючи їхньому виштовхуванню градієнтними силами вздовж осі поширення.

2.2. Вибір робочої довжини хвилі випромінювання

Експериментально встановлено, що потужності випромінювання на довжинах хвиль 1064 нм, 532 нм

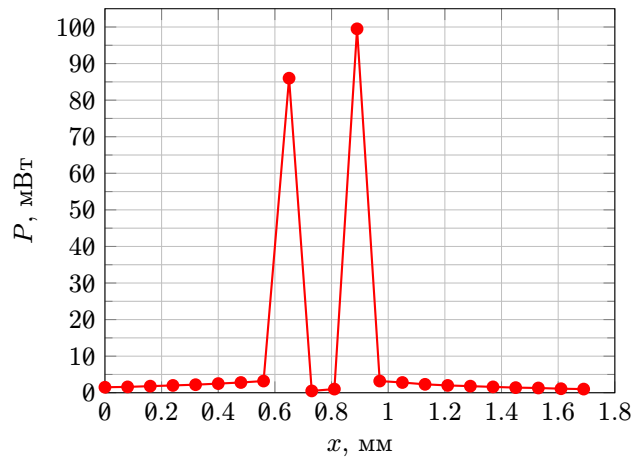


Рис. 3. Профіль інтенсивності кільцевого пучка, сформованого лазером з $\lambda = 532$ нм

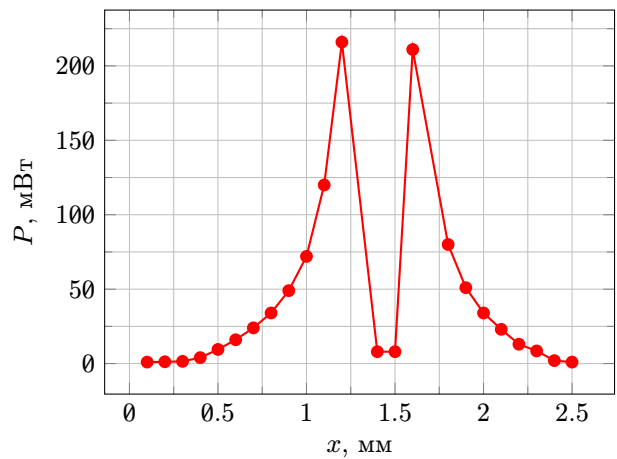


Рис. 4. Профіль інтенсивності кільцевого пучка, сформованого лазером з $\lambda = 1064$ нм

та 450 нм недостатньо для стабільної фіксації частинок. Для реалізації режиму захоплення було обрано аргоновий лазер, що забезпечує вищу інтенсивність та необхідну стабільність формування оптичної пастки.

Висновки

- У роботі розроблено та експериментально реалізовано оптичну систему формування порожнистого (кільцевого) лазерного пучка на основі подвійної аксиконної схеми, що забезпечує керувану трансформацію гаусового пучка у структуроване світлове поле з осьовим мінімумом інтенсивності.
- Експериментально підтверджено формування характерного кільцевого розподілу інтенсивності для довжин хвиль 1064 нм та 532 нм, що проявляється у наявності локального мінімуму на оптичній осі та симетричних максимумів на периферії пучка.
- Показано, що сформований просторовий розподіл інтенсивності створює потенціальну яму в центральній області пучка, що, у свою чергу, є

необхідною умовою для стабільного утримання мікрочастинок в оптичних пастках, особливо для поглинальних об'єктів.

- Використання аксиконів є ефективним і відтворюваним методом формування кільцевих пучків без необхідності в складних фазових модуляторах.
- Було виявлено обмеження, пов'язані з недостатньою потужністю використаних лазерних джерел для забезпечення стабільного тривимірного механічного утримання частинок.

Перелік використаних джерел

1. Jones P. H., Volpe G., Maragò O. M. Optical tweezers: principles and applications. — Cambridge University Press, 2015. — 561 с. — ISBN 9781107279711. — DOI: [10.1017/CB09781107279711](https://doi.org/10.1017/CB09781107279711).
2. Ashkin A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime // Biophysical journal. — 1992. — С. 569—582. — DOI: [10.1016/s0006-3495\(92\)81860-x](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(92)81860-x).
3. Ashkin A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers // Proceedings of the national academy of sciences. — 1997. — Vol. 94, no. 10. — P. 4853–4860. — DOI: [10.1364/OE.22.011312](https://doi.org/10.1364/OE.22.011312).
4. McGloin D. Optical tweezers: 20 years on // Philosophical transactions of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences. — 2006. — Vol. 364, no. 1849. — P. 3521–3537. — DOI: [10.1098/rsta.2006.1891](https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1891).
5. Bowman R. W., Padgett M. J. Optical trapping and binding // Reports on progress in physics. — 2013. — Vol. 76, no. 2. — P. 026401. — DOI: [10.1088/0034-4885/76/2/026401](https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/2/026401).
6. Ashkin A. History of optical trapping and manipulation of small-neutral particle, atoms, and molecules // EEE journal of selected topics in quantum electronics. — 2000. — Vol. 6, no. 6. — P. 841–856. — DOI: [10.1109/2944.902132](https://doi.org/10.1109/2944.902132).
7. Optical trapping with structured light: a review / Y. Yang, Y.-X. Ren, M. Chen, Y. Arita, C. Rosales-Guzmán // Advanced photonics. — 2021. — Vol. 3, no. 03. — DOI: [10.1117/1.ap.3.3.034001](https://doi.org/10.1117/1.ap.3.3.034001).
8. Kalume A., Wang C., Pan Y.-L. Optical-Trapping laser techniques for characterizing airborne aerosol particles and its application in chemical aerosol study // Micromachines. — 2021. — Vol. 12, no. 4. — P. 466. — DOI: [10.3390/mi12040466](https://doi.org/10.3390/mi12040466).
9. Advanced optical trapping by complex beam shaping / M. Woerdemann, C. Alpmann, M. Esseling, C. Denz // Laser & photonics reviews. — 2013. — Vol. 7, no. 6. — P. 839–854. — DOI: [10.1002/lpor.201200058](https://doi.org/10.1002/lpor.201200058).
10. Yoon Y. Z., Cicuta P. Optical trapping of colloidal particles and cells by focused evanescent fields using conical lenses // Optics express. — 2010. — Vol. 18, no. 7. — P. 7076–7084. — DOI: [10.1364/oe.18.007076](https://doi.org/10.1364/oe.18.007076).
11. Optical system for trapping particles in air / R. Kampmann, A. K. Chall, R. Kleindienst, S. Sinzinger // Applied optics. — 2014. — Vol. 53, no. 4. — P. 777–784. — DOI: [10.1364/ao.53.000777](https://doi.org/10.1364/ao.53.000777).
12. Gong Z., Pan Y.-L., Wang C. Optical configurations for photophoretic trap of single particles in air // Review of scientific instruments. — 2016. — Vol. 87, no. 10. — DOI: [10.1063/1.4963842](https://doi.org/10.1063/1.4963842).