

І.В. БЛОНСЬКИЙ,<sup>1</sup> В.М. КАДАН,<sup>1</sup> А.А. ДЕРГАЧЕВ,<sup>2</sup> С.А. ШЛЬОНОВ,<sup>2</sup>  
В.П. КАНДІДОВ,<sup>2</sup> В.М. ПУЗІКОВ,<sup>3</sup> Л.О. ГРИНЬ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Інститут фізики НАН України

(Просп. Науки, 46, Київ 03650; e-mail: kadan@iop.kiev.ua)

<sup>2</sup> Відділення фізики і Міжнародний лазерний центр,

Московський державний університет ім. М.В. Ломоносова

(Москва 119899, Росія; e-mail: shlenov@physics.msu.ru)

<sup>3</sup> Інститут монокристалів НАН України

(Просп. Леніна, 60, Харків 61001; e-mail: info@isc.kharkov.com)

## ФІЛАМЕНТАЦІЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВИХРОВОГО ПУЧКА В САПФІРІ

УДК 535.3; 535.5; 534-16

*Досліджено філаментацию потужного фемтосекундного пучка, який несе оптичний вихор з топологічним зарядом  $l = 2$  в сапфірі. Запропоновано і продемонстровано спосіб контролю азимутального положення філаментів шляхом зміни різниці фаз між когерентними і співосними вихровим і референтним безвихровим пучками. Спостережена непаралельність траєкторій філаментів при перетині під невеликим кутом оптичного вихору і безвихрової плоскої хвилі пояснена з точки зору спірального поширення філаментів навколо осі оптичного вихору.*

*Ключові слова:* філаментация, фемтосекундний, вихрові пучки, топологічний заряд.

### 1. Вступ

Починаючи з основоположної роботи [1] постійно зростає інтерес до гвинтових дислокацій хвильового фронту або оптичних вихорів (ОВ) та інших сингулярностей оптичних полів. Широко відомі дослідження з сингулярної оптики, виконані у відділі оптичної квантової електроніки Інституту фізики НАН України [2–6]. ОВ мають фазову сингулярність на осі з нульовою інтенсивністю, а миттєва фаза хвилі ОВ залежить від азимутального кута навколо осі, змінюючись на величину  $2\pi l$  при повному оберті. Топологічний заряд  $l = \pm 1, \pm 2, \dots$  визначає орбітальний момент, який переноситься вихором. Інтерес до ОВ зумовлений їх значенням для теорії і численними прикладними застосуваннями, до яких відносяться оптичне захоплення, оптична мікроманіпуляція, квантова і телекомунікація [7, 8]. Проте, незважаючи на велику кількість робіт з нелінійно-оптичних явищ в ОВ, вони, зокрема філаментация в ОВ, все ще недостатньо вивчені. Філаментация в ОВ вперше спостерігалася в парах натрію [10], і пізніше вивчалася в різних середовищах [10, 11]. Аналіз азимутальної

модуляційної нестабільності в ОВ в керрівському середовищі виконаний в [12]. В роботі [13] було показано, що азимутальна модуляція змінює динаміку самофокусування, приводячи до формування регулярної структури філаментів. Вплив інерційності плазмоутворення на стабільність поширення ОВ чисельно досліджений в [14]. В роботі [15] запропоновано використання ОВ для керування положенням початку мультифіламентациї в повітрі.

В цій роботі наведено розрахункові і експериментальні дослідження філаментациї фемтосекундного вихрового пучка з топологічним зарядом  $l = 2$  в сапфірі. Запропонований спосіб керування азимутальним положенням філаментів шляхом зміни фазового зсуву між колінеарними взаємно когерентними вихровим променем і квазіплоским референтним безвихровим променем. Спосіб підтверджений результатами математичного моделювання і реалізований експериментально. Спостережена непаралельність філаментів, утворених при перетині взаємно когерентних квазіплоского і вихрового променів пояснена спіральністю їх траєкторій.

### 2. Експеримент і обговорення

У ролі джерела збудження використовували фемтосекундний комплекс з регенеративним підсилю-

вачем РП (Legend F-1к-He), який забезпечував генерацію горизонтально поляризованих лазерних імпульсів з такими параметрами: енергія імпульсу 2,5 мДж, тривалість  $\tau_p = 160$  фс, довжина хвилі в максимумі  $\lambda_{\max} = 800$  нм, частота повторення імпульсів 1 кГц. Схему експериментальної установки наведено на рис. 1. Лазерне випромінювання розщеплювалося на дві складові в пропорції 80% і 20%. Більш інтенсивний промінь проходить скрізь вузол регулювання потужності, який складається з напівхвильової пластинки  $\lambda/2$  і призми Глана П1, встановленої на пропускання вертикальної поляризації. Далі вертикально поляризований промінь надходить на вузол генерації ОВ. З цією метою нами використана модифікована схема генерації бездисперсійного ОВ в одноосному кристалі ісландського шпату ІШ 1,5 см завтовшки, вперше запропонована в роботі [16]. Нами отриманий горизонтально поляризований ОВ з енергією імпульсу до 200 мкДж з топологічним зарядом  $l = 2$  діаметром 2 мм, фотографія якого наведена на верхній вставці на рис. 1. Після відбивання напівпрозорим дзеркалом НД ОВ фокусувався лінзою Л5 з фокусною відстанню 8 см на передню грань полірованого високоякісного зразка КС з монокристалічного сапфіру прямокутного перерізу  $3 \times 3$  мм, виготовленого в Інституті монокристалів НАН України, м. Харків. В матеріалі зразка відбувається самофокусування фемтосекундного випромінювання і утворення філаментів [17]. Через наявність в зразку домішок іонів  $Ti^{3+}$  рекомбінація плазмового каналу філаменту спричиняє яскраве люмінесцентне випромінювання, яке дозволяє реєструвати конфігурацію треків філаментации за допомогою ПЗ3-камери з мікроскопічним об'єктивом ПЗ32. Поперечний переріз розподілу інтенсивності випромінювання в зразку реєструється за допомогою ПЗ3-камери з мікроскопічним об'єктивом ПЗ31. Для недопущення пошкодження матриці ПЗ31 прямим лазерним випромінюванням між об'єктивом і матрицею встановлений нейтральний фільтр з послабленням  $5 \times 10^3$ .

Утворення філаментів у зразку вивчалось як при фокусуванні ОВ окремо, так і спільному фокусуванні в зразок ОВ і когерентного з ним безвихрового лазерного променя діаметром близько 5 мм. З цією метою відщеплена частина променя підсилювача подавалася на лінію затримки ЛЗ, яка забезпечувала часове збігання обох імпульсів

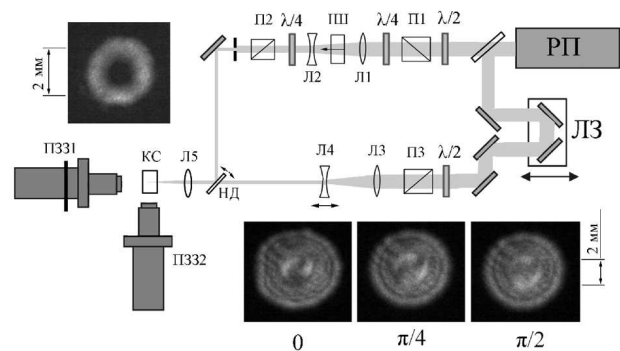
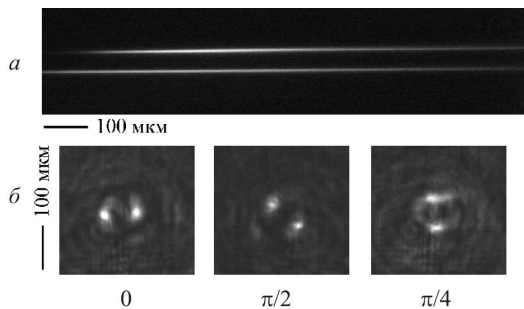


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки

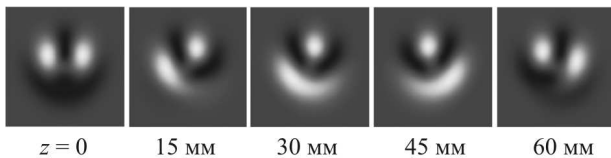
в зразку і зміну різниці фаз між ними. Після лінії затримки потужність пучка регулювалася за допомогою фазової пластинки  $\lambda/2$  і призми Глана П3, встановленої на пропускання горизонтальної поляризації, його діаметр коригувався телескопом Л3, Л4, і обидва пучки просторово зводилися за допомогою напівпрозорого дзеркала НД.

На нижній вставці на рис. 1 наведені фотографії інтерференції цих двох співосних пучків після дзеркала НД для декількох положень лінії затримки в межах часового збігання імпульсів і відповідна зміна різниці фаз. Спостережене обертання двох інтерференційних максимумів навколо осі пучка пояснюється зміною фазової різниці між ОВ і безвихровим пучком при невеликому зсуві лінії затримки. На жаль, технічні характеристики ЛЗ не забезпечують достатньо прецизійне встановлення різниці фаз, тому при зміні затримки в межах тривалості імпульсу (160 фс) конкретна реалізація різниці фаз виявляється випадковою. Тим не менше, азимутальний поворот двох інтерференційних максимумів під час зміни фази доводить те, що нами дійсно отриманий ОВ з топологічним зарядом  $l = 2$ .

При фокусуванні цих двох співосних пучків, в зразку КС спостерігається утворення філаментів, які камерою ПЗ32 реєструються у вигляді двох тонких паралельних треків люмінесценції, відстань між якими залежить від положення ЛЗ (рис. 2, а). Камера ПЗ31 реєструє точкову локалізацію поперечного перерізу розподілу інтенсивності в зразку, характерну для філаментации (рис. 2, б). Азимутальне положення філаментів і в цьому випадку залежить від положення лінії затримки. Спостережені особливості філаментации, як і наведеної вище картини інтерференції,



**Рис. 2.** Треки люмінесценції і поперечний розподіл інтенсивності на відстані 1,5 мм від вихідної грані зразка при збудженні співосними ОВ і безвихровим пучками. Енергія імпульсу кожного пучка дорівнює 2 мкДж



**Рис. 3.** Результати числового моделювання інтерференції оптичного вихору з топологічним зарядом  $l = 2$  і плоскої хвилі. Розмір кожного фрагмента дорівнює 150 мкм



**Рис. 4.** Непаралельні треки філаментції при перетині когерентних ОВ і плоскої хвилі під невеликим кутом в сапфірі. Довжина фотографії дорівнює 1 мм

ції, пояснюються зміною фазового зсуву між двома пучками. Дійсно, максимумами інтерференційної картини діють як центри нуклеації для зародження філаментів [18], і тому їх азимутальне положення визначається різницею фаз між двома пучками. Таким чином, шляхом зміни різниці фаз між двома інтерферуючими пучками здійснюється управління азимутальним положенням філаментів.

На наш погляд, при поширенні когерентних ОВ і плоскої безвихрової пучка під невеликим кутом може спостерігатися таке незвичне явище, як спіральні треки філаментції [19]. Дійсно, набіг різниці фази між ОВ і плоским пучком у такому випадку становить  $\Delta\phi = 2\pi\theta^2 z/\lambda$ , де  $\theta$  – кут між ОВ і безвихровим пучками,  $z$  – відстань поширення вздовж осі ОВ,  $\lambda$  – довжина хвилі світла в сере-

довиці. На довжині поширення  $z = \lambda/\theta^2$  різниця фаз дорівнює  $2\pi$ , тобто інтерференційна картина, а значить і філаменти в її максимумах, здійснюють повний оберт навколо осі ОВ.

Нами виконане числове моделювання розподілу інтенсивності при інтерференції в сапфірі двох таких променів, яке підтверджує припущення про спіральну траєкторію інтерференційних максимумів. Перший являє собою кільцевий пучок з топологічним зарядом  $l = 2$ :

$$E_1(x, y) = Ar^l \exp \left[ -\frac{r^2}{2a_0^2} + il \arctan(x, y) \right],$$

де  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ ;  $l = 2$ ;  $A = 1$ ;  $a_0 = 20$  мкм (ширина кільця  $\approx 80$  мкм).

Друга хвиля – плоска, яка перетинається з першою під кутом  $0,2^\circ$ . Розрахункову залежність поперечного розподілу інтенсивності від довжини поширення  $z$  наведено на рис. 3.

Ми експериментально спостерігаємо непаралельність траєкторій філаментів у випадку введення невеликого кута між ОВ і безвихровим пучком (рис. 4).

Нелінійна динаміка філаментції, яка визначається центрами нуклеації філаментів у локальних максимумах інтенсивності, може в даному випадку привести до утворення спіральних траєкторій навколо осі ОВ. У припущенні спіральності траєкторій, спостережена непаралельність відповідає їх обертанню на кут  $13^\circ$  навколо осі ОВ після проходження  $0,9$  мм в сапфірі.

Таким чином, нами чисельно і експериментально досліджена філаментція потужного фемтосекундного оптичного вихору з топологічним зарядом  $l = 2$  в сапфірі. Запропонований і реалізований спосіб управління азимутальним положенням філаментів шляхом зміни різниці фаз між взаємно когерентними співосними оптичним вихором і безвихровою плоскою референтною хвилею. Спостережена непаралельність траєкторій філаментів при перетині під невеликим кутом оптичного вихору і безвихрової плоскої хвилі пояснена з точки зору спірального поширення філаментів навколо осі ОВ.

*Робота виконана з використанням методичних можливостей лазерного фемтосекундного центра для колективного використання НАН України. Автори вдячні за фінансову підтримку Укра-*

їнському науково-технологічному центру (проект 5721), Російсько-Українській програмі розвитку співробітництва в галузі нанотехнологій в 2012–2013 рр. (проект М312) і Державному фонду фундаментальних досліджень України.

1. J.F. Nye and M.V. Berry, Proc. R. Soc. Lond. A **336**, 165 (1974).
2. M.S. Soskin and M.V. Vasnetsov, in *Progress in Optics*, edited by E. Wolf, (Elsevier, Amsterdam, 2001), p. 219.
3. M. Vasnetsov and K. Staliunas, *Optical Vortices* (Nova Science, New York, 1999).
4. M.S. Soskin, V.N. Gorshkov, M.V. Vasnetsov, J.T. Malos, and N.R. Heckenberg, Phys. Rev. A **56**, 4064 (1997).
5. M. Vasnetsov, V. Pas'ko, A. Khoroshun, V. Slyusar, and M. Soskin, Opt. Lett. **32**, 1830 (2007).
6. M. Soskin, M. Vasnetsov, V. Denisenko, and V. Slyusar, *New Directions in Holography and Speckles* (Amer. Sci. Publ., New York, 2008).
7. D.L. Andrews, *Structured Light and Its Applications*, (Academic Press, San Diego, CA, 2008).
8. G. Gibson, J. Courtial, M. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S. Barnett, and S. Franke-Arnold, Opt. Express **12**, 5448 (2004).
9. M.S. Bigelow, P. Zerom, and R.W. Boyd, Phys. Rev. Lett. **92**, 083902 (2004).
10. D.N. Neshev, A. Dreischuh, G. Maleshkov, M. Samoc, and Y.S. Kivshar, Opt. Express **18**, 18368 (2010).
11. P. Hansinger, A. Dreischuh, and G.G. Paulus, Appl. Phys. B **104**, 561 (2011).
12. T.D. Grow, A. Ishaaya, A.L. Gaeta, G. Fibich, G.W. 't Hooft, and E.R. Eliel, Phys. Rev. Lett. **96**, 133901 (2006).
13. S. Shiffler, P. Polynkin, and J. Moloney, Opt. Lett. **36**, 3834 (2011).
14. O. Khasanov, T. Smirnova, O. Fedotova, G. Rusetsky, and O. Romanov, Appl. Opt. **51**, C198 (2012).
15. A. Vinçotte and L. Bergé, Phys. Rev. Lett. **95**, 193901 (2005).
16. V.G. Shvedov, C. Hnatovsky, W. Krolikowski, and A.V. Rode, Opt. Lett. **35**, 2660 (2010).

17. A.A. Дєргачєв, В.Н. Кадан, С.А. Шлєнов, Квант. електроніка **42**, 125 (2012),
18. A. Couaïron and A. Mysyrowicz, Phys. Rep. **441**, 47 (2007).
19. Ting-Ting Xi, Xin Lu, and Jie Zhang, Phys. Rev. Lett. **96**, 025003 (2006).

Одержано 28.02.13

*И.В. Блонский, В.Н. Кадан,  
А.А. Дєргачєв, С.А. Шлєнов, В.П. Кандидов,  
В.М. Пузиков, Л.А. Гринь*

#### ФИЛАМЕНТАЦИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВИХРЕВОГО ПУЧКА В САПФИРЕ

#### Р е з ю м е

Исследована филаментация мощного фемтосекундного вихревого пучка с топологическим зарядом  $l = 2$  в сапфире. Предложен и продемонстрирован способ контроля азимутального положения филаментов путем изменения разности фаз между двумя когерентными и соосными вихревым и референтным безвихревым пучками. Наблюдаемая непараллельность траекторий филаментов при пересечении под небольшим углом оптического вихря и безвихревой плоской волны объяснена с точки зрения спирального распространения филаментов вокруг оси оптического вихря.

*I.V. Blonskyi, V.M. Kadan,  
A.A. Dergachev, S.A. Shlenov, V.P. Kandidov,  
V.M. Puzikov, L.O. Grin'*

#### FILAMENTATION OF FEMTOSECOND VORTEX BEAM IN SAPPHIRE

#### S u m m a r y

Filamentation of powerful femtosecond beams with a vortex of the topological charge  $l = 2$  in sapphire is studied. A method to control the azimuthal position of filaments by changing the phase difference between two coherent co-axial beams, vortex and vortex-free reference ones, is proposed and demonstrated. The observed misalignment between the paths of filaments generated by the vortex and vortex-free beams, when they cross at a small angle is explained in terms of the spiral propagation of filaments around the vortex optical axis.