

I.В. БЛОНСЬКИЙ,<sup>1</sup> В.М. КАДАН,<sup>1</sup> О.Й. ШПОТЮК,<sup>2</sup> П.І. КОРЕНЮК,<sup>1</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> НДІ матеріалів НВП “Карат”  
(Вул. Стрийська, 202, Львів 79031; e-mail: shpotyuk@novas.lviv.ua)

<sup>3</sup> Інститут монокристалів НАН України  
(Просп. Леніна, 60, Харків 61001; e-mail: info@isc.kharkov.com)

## ФІЛАМЕНТАЦІЯ В ОБЛАСТІ ПЕРЕТИНУ ДВОХ ФЕМТОСЕКУНДНИХ ЛАЗЕРНИХ ПРОМЕНІВ У САПФІРІ

УДК 539

*Досліджено явище філаментации при перетині двох фемтосекундних лазерних променів у монокристалічному сапфірі. Визначено умови утворення регулярної мультифіламентної структури (МФС), параметри якої залежать від енергії імпульсу, кута перетину і різниці фаз між двома збуджуючими променями. Вперше, як окрему реалізацію МФС, досліджено процес формування одинарних філаментів при дії двох різних променів збудження. Продемонстровано, що число філаментів в МФС залежить від кількості інтерференційних максимумів в області перетину променів, потужність яких перевищує критичну потужність самофокусування. Звернуто увагу на можливість керування мультифіламентною структурою шляхом зміни різниці фаз між взаємодіючими променями. Спостережено оптичні прояви “притягувального” і “відштовхувального” характеру взаємодії філаментів. Вивчено спектр осьового випромінювання одинарного філамента залежно від його довжини. Показано, що у формуванні осьового спектра його випромінювання визначальну роль відіграє процес чотирихвильового змішування.*

*Ключові слова:* фемтосекундні лазерні імпульси, ефект Керра, філаменти, сапфір, самофокусування, осьове випромінювання.

### 1. Вступ

Останнім часом досягнуто значного прогресу в технології модифікації різноманітних оптоелектронних матеріалів надкороткими лазерними імпульсами. Було показано, що сильно сфокусовані лазерні імпульси, зокрема в режимі філаментации, є особливо корисними для створення хвильоводів в об’ємі матеріалу, оптичних розгалужувачів, ґраток, елементів оптичної пам’яті [1, 2]. Тому вивчення особливостей поширення фемтосекундних лазерних імпульсів у таких матеріалах, включаючи ефекти філаментации, важливе не тільки з точки зору фундаментальної науки, а і для можливих практичних застосувань.

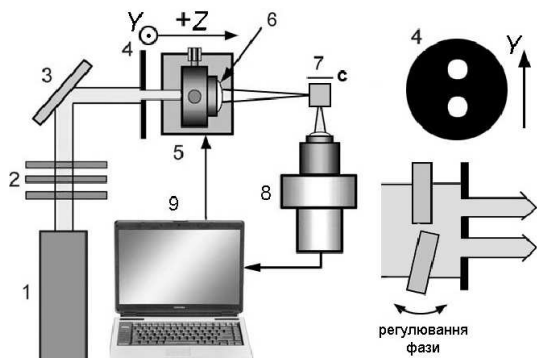
Якщо потужність лазерного імпульсу перевищує порогову, то самофокусування домінує над дифракційним розбіганням. В результаті відбувається

філаментация пучка [2], і суттєва зміна режиму поширення імпульсу. При перевищенні порогової потужності в багато разів внаслідок модуляційної нестійкості з’являються множинні філаменти, між якими можливі взаємодія і енергообмін. Тому вивчення взаємодії філаментів є важливим для розуміння і точного контролю явища множинної філаментации, зокрема з метою модифікації оптоелектронних матеріалів фемтосекундними лазерними імпульсами.

Низку експериментальних і теоретичних робіт було присвячено взаємодії філаментів у повітрі [3–10] і прозорих твердих тілах [11]. В роботі [9] вивчалось утворення періодичних модуляцій густини плазми в масштабі довжини хвилі, які здатні транспортувати вхідні імпульси аналогічно фотонному кристалу при кутах перетину від 2° до 16°. В роботі [10] моделювалася взаємодія фемтосекундних філаментів при кутах перетину 0,01°–0,1°. Показано, що взаємодія приводить до притягуван-

© I.В. БЛОНСЬКИЙ, В.М. КАДАН, О.Й. ШПОТЮК,  
П.І. КОРЕНЮК, В.М. ПУЗІКОВ, Л.О. ГРИНЬ, 2014

ISSN 2071-0194. Укр. фіз. журн. 2014. Т. 59, № 3



**Рис. 1.** Схема експериментальної установки: 1 – регенеративний підсилювач Legend F-1K-HE; 2 – нейтральні фільтри; 3 – поворотне дзеркало; 4 – діафрагма; 5 – координатний столик; 6 – об’єктив; 7 – зразок; 8 – об’єктив мікроскопа і ПЗЗ-камера; 9 – РС

ня для синфазних філаментів, і навпаки, при протилежній фазі домінує відштовхування. В результаті злиття двох синфазних філаментів передбачається утворення єдиного стабільного філамента. Наскільки нам відомо, експериментальне підтвердження цього теоретичного висновку, зокрема в твердих прозорих діелектриках, досі відсутнє. В роботі [11] регулярна МФС була сформована в кварцовому склі при накачці двома променями, що перетинаються. При цьому кожен філамент генерує свій власний суперконтинуум. Автори [11] обмежилися дослідженням взаємної когерентності множинних джерел суперконтинууму. Проте ніякого дослідження впливу різниці фаз променів збудження на МФС не проводилося.

Метою даної роботи є вивчення взаємодії між двома філаментами в монокристалічному сапфірі при кутах перетину від  $1,2^\circ$  до  $5^\circ$  і різниці фаз променів збудження від  $0$  до  $180^\circ$ . Просторовий період інтерференційної картини при таких кутах перетину є меншим за діаметр променя накачки в області перетину, тому залежно від енергії і фази в області перетину може бути сформований як єдиний філамент, так і МФС.

## 2. Експеримент

Процеси філаментації і взаємодії філаментів були візуалізовані шляхом реєстрації інтегрованої у часі флуоресценції сапфіру, яка випромінюється з плазмового каналу в напрямку, перпендикулярному до осі поширення імпульсів. Також реєструва-

лися спектри аксіальної емісії філаментів. Схема експериментальної установки показана на рис. 1.

Регенеративний підсилювач 1 генерує послідовність імпульсів (2,5 мДж, 150 фс, 818,5 нм) з частотою повторення 1 кГц. Набір нейтральних фільтрів 2 забезпечує необхідну енергію імпульсів. Діафрагма 4 вирізає два більш вузькі паралельні промені діаметром 1 або 1,5 мм, осі яких знаходяться на відстані 2,4 або 3 мм. Вони направляються в об’єктив 6 з фокальною відстанню 43 або 65 мм. Дві ідентичні пластинки з плавленого кварцу 1 мм завтовшки були внесені в оптичний шлях променів перед діафрагмою 4. Нахил однієї з пластинок забезпечує необхідний фазовий зсув між двома променями. Лінза 6 укріплена на моторизованому однокоординатному столику, який рухається вздовж осі  $Z$ . Відстань між діафрагмою 4 і лінзою 6 дорівнює 10 см при положенні координатного столика  $Z = 0$ . Полірований зразок з монокристалічного сапфіру 7 розмірами  $3 \times 3 \times 20$  мм укріплений за лінзою таким чином, що фокальна точка при  $Z = 0$  знаходиться всередині зразка, а його кристалічна вісь паралельна осі  $Z$ . Об’єктив 8 ( $\times 3,7$  або  $\times 10$ ) відображає область взаємодії філаментів на  $1200 \times 1600$  монохромну ПЗЗ-матрицю камери 8 з розміром пікселя  $4,4 \times 4,4$  мкм в масштабі 1,08 або 0,4 мкм/піксель з просторовою роздільною здатністю 3 або 2 мкм, відповідно.

У наступному експерименті вимірювалися спектри аксіальної емісії філаментів. Для цього світло осьової емісії за допомогою оптичного волоконного хвильоводу, який фіксується на відстані 15 см від задньої поверхні зразка, вводиться у вхідну щілину спектрографа SP-2500i з фокусною відстанню 500 мм, обладнаного ПЗЗ-детектором SPEC-10.

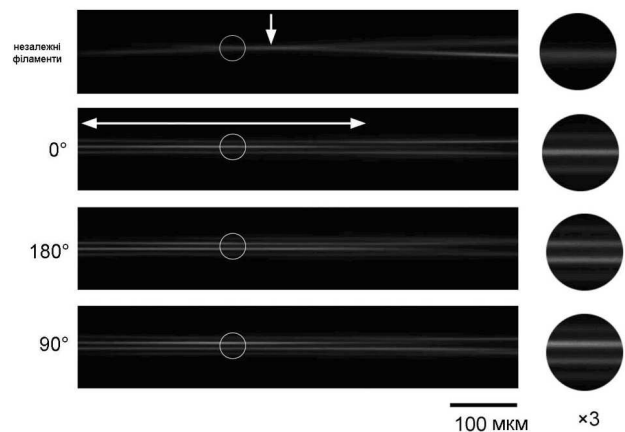
У ролі експериментального матеріалу було вибрано монокристалічний сапфір, ширина забороненої зони якого становить 9,9 еВ, показник заломлення  $n_0 = 1,76$  на довжині хвилі 0,8 мкм, а нелінійний показник заломлення  $n_2 = 2,5 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт. Були виготовлені зразки розміром  $3 \times 3 \times 20$  мм, в яких кристалічна вісь орієнтована вздовж меншої сторони.

## 3. Результати та їх обговорення

На рис. 2 показано взаємодію двох когерентних фемтосекундних пучків, які перетинаються під кутом  $2\alpha = 3,2^\circ$ . Реєстрація здійснювалася за до-

помогою ПЗЗ-камери 8 у світлі люмінесценції сапфіру, яке виникає внаслідок релаксації вільних носіїв заряду в плазмовому каналі філамента. Пучки збудження направлені зліва направо. Енергія кожного імпульсу збудження дорівнює 2,0 мкДж. На верхньому фрагменті рис. 2 показано перетин двох некогерентних не збігаючих в часі філаментів. Для отримання цього фрагмента було видалено одну з двох пластинок регулювання фази. Часова різниця  $\sim 2,5$  пс, яка виникає в результаті цього між двома імпульсами, є значно більшою за тривалість імпульсу, виключаючи таким чином взаємодію імпульсів по керрівському механізму. З іншого боку, невеликий розбаланс енергій, внесений видаленням пластинки, пояснює різницю інтенсивності двох філаментів. Точка перетину двох незалежних філаментів, показана білою стрілкою на рис. 2, вказує на положення фокальної площини лінзи 5. Філаментация у такому випадку починається до геометричного фокуса.

Наступний фрагмент ( $0^\circ$ ) показує картину взаємодії при нульовій різниці фаз між двома імпульсами, що збігаються у часі. В області перетину утворюється МФС у вигляді трьох еквідистантних паралельних філаментів, показана білою стрілкою. Необхідно звернути увагу на те, що у випадку часового узгодження імпульсів накачки МФС починається значно ближче до вхідної грані зразка, ніж у випадку незалежних філаментів. Цей факт вказує на те, що до формування МФС причетні обидва імпульси накачки. Виходячи також з того факту, що довжина МФС ( $\sim 400$  мкм) значно перевищує довжину перетину ядер філаментів, стає зрозумілим, що в її утворенні беруть участь більш широкі низькоінтенсивні енергетичні резервуари кожного філамента. Філаменти в МФС розділені відстанню  $d = 8$  мкм, причому найбільш інтенсивний центральний філамент розташований симетрично вздовж бісектриси двох не взаємодіючих філаментів. Положення і відстань між філаментами в МФС відповідають розрахованим положенням максимумів інтерференційної картини, утвореної двома імпульсами з однаковою фазою, довжиною хвилі 820 нм і кутом перетину в сапфірі  $3,2^\circ$ . Внесення різниці фаз  $180^\circ$  між двома філаментами (див. наступний фрагмент нижче) призводить до вертикального зсуву МФС на  $d/2$ , відповідно до зсуву максимуму інтерференційної картини. При фазовому зсуві  $180^\circ$  утворю-



**Рис. 2.** МФС, утворена при перетині двох когерентних фемтосекундних пучків в сапфірі під кутом  $2\alpha = 3,2^\circ$  при різних відносних фазах. Різниця фаз показана зліва від кожного фрагмента. Справа – збільшені зображення фрагментів мультифіламентної структури

ється симетрична МФС з двома однаковими інтенсивними центральними і двома слабкими периферійними філаментами, відстань між якими дорівнює 8 мкм. При фазовому зсуві  $90^\circ$  утворюється асиметрична структура чотирьох філаментів (нижній фрагмент). Для інтерференційної картини двох променів з фазовим зсувом  $90^\circ$ , так само, як і для фазових зсувів  $0^\circ$  і  $180^\circ$ , положення філаментів і інтервали між ними відповідають розрахованим положенням максимумів.

З наведених вище результатів можна зробити висновок, що два взаємно когерентні філаменти спочатку зникають в області перетину і передають свою енергію енергетичним резервуарам. Замість цього в області перетину утворюється МФС, причому кількість, інтенсивність і положення МФС визначаються інтерференційною картиною двох резервуарів. Загальна ширина МФС 24 мкм якісно вказує на діаметр енергетичного резервуара філаментів  $D$ .

В перехідній області між філаментами і МФС проявляються ефекти притягування і відштовхування філаментів. Ця перехідна область є фактично областю зменшеного контрасту інтерференційної картини, оскільки там резервуари перетинаються тільки частково. Суперпозиція низько контрастних інтерференційних смуг і власних градієнтів інтенсивності світлового поля імпульсів збудження призводить до зсуву локальних максимумів

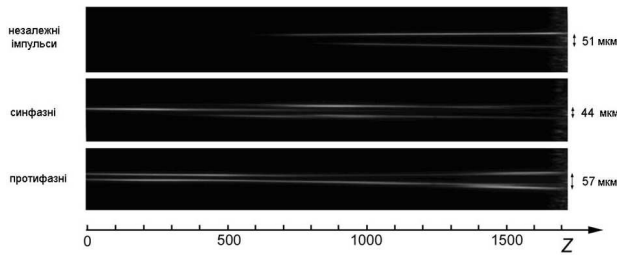


Рис. 3. Взаємодія двох філаментів, які перетинаються під кутом  $2\alpha = 1,2^\circ$  при різних відносних фазах

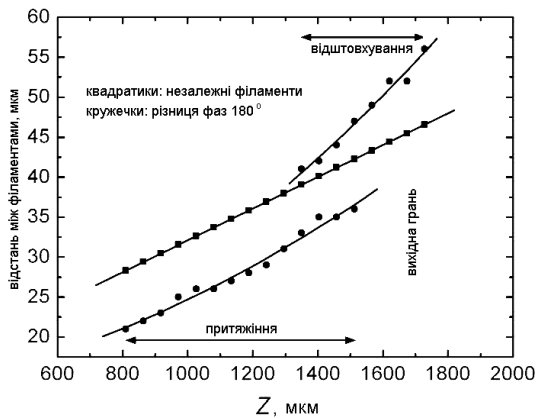


Рис. 4. Залежність відстані між філаментами від  $Z$

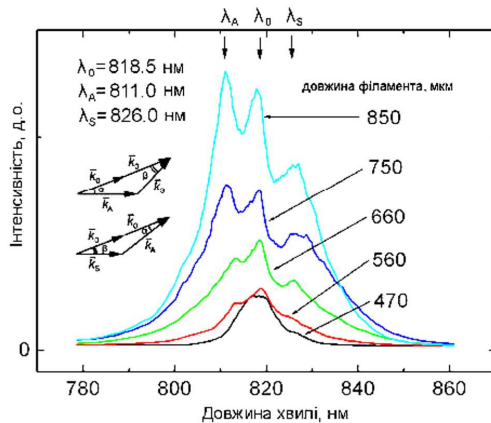


Рис. 5. Спектри аксіальної емісії єдиного філамента залежно від його довжини,  $E_{\text{pulse}} = 2,4$  мкДж

мів інтенсивності по відношенню до ідеальних позицій смуг, і, як наслідок, до зміщення положення філаментів. Для того щоб зробити таку взаємодію більш очевидною, ми зменшили енергію імпульсу і кут перетину.

На рис. 3 показано зону МФС двох філаментів і навколишні області вздовж осі  $Z$ . Кожен імпульс має енергію 1,5 мкДж, а кут перетину дорівнює  $2\alpha = 1,2^\circ$ . Імпульси накачки поширюються зліва направо. При такій енергії імпульсів філаментація зсунутих у часі імпульсів починається вже після геометричного фокуса. В області МФС утворюється тільки єдиний філамент при різниці фаз  $0^\circ$  і два паралельні філаменти на відстані 20 мкм при різниці фаз  $180^\circ$ . Правий край фотографії збігається з вихідною площиною зразка. Як і в попередньому випадку, положення і відстань між філаментами МФС відповідають розрахунковим положенням максимумів інтерференційної картини. На нижньому фрагменті, який отримано при різниці фаз  $180^\circ$ , показано неперервний перехід між МФС (два філаменти розділені на  $d = 20$  мкм) до двох незалежних філаментів, що розходяться. Необхідно звернути увагу на те, що відстань між філаментами на вихідній грані, яка показана справа від кожного фрагмента, у всіх трьох випадках є різною. Для філаментів з однаковою фазою відбувається притягування, і навпаки, протифазні філаменти відштовхуються. Проте, для різних положень вздовж осі  $Z$  ситуація може бути різною.

На рис. 4 показана залежність відстані між філаментами від  $Z$  для різниці фаз  $180^\circ$  в порівнянні з незалежними зсунутими в часі філаментами, відповідно даним з рис. 3. Можна бачити, що в діапазоні 800–1500 мкм домінує притягування, яке змінюється відштовхуванням від 1400 до 1700 мкм. Звернемо увагу, що автори роботи [10] передбачали тільки відштовхування двох філаментів з протилежною фазою, які перетинаються у повітрі під кутом  $\alpha = 0,01^\circ$ . Ми вважаємо, що фізичною причиною такої різниці є відношення  $r = D/d$  (діаметр енергетичного резервуара)/(інтервал між смугами інтерференційної картини). Таке відношення дорівнює  $r \approx 0,5$  в повітрі при  $\alpha = 0,01^\circ$  в припущенні, що  $D = 1$  мм. Але в сапфірі  $r \approx 1$  при  $\alpha = 0,6^\circ$  і  $D = 24$  мкм. Це означає, що в повітрі домінує деструктивна інтерференція між двома імпульсами навіть при слабкому перетині, внаслідок чого виникає тільки відштовхування. На відміну від цього в сапфірі інтервал між смугами дорівнює  $D$ . Таким чином, крім центрального мінімуму, виникають конструктивні максимуми, рознесені на 20 мкм. При збільшенні  $Z$  власні максимуми імпульсів розходяться, що викликає зсув резуль-

туючих максимумів внаслідок суперпозиції інтерференційних смуг низького контрасту і власного розподілу інтенсивності світлового поля імпульсів накачки, спочатку у напрямку центра, а далі від центра. Це і призводить до спостереження як притягування, так і відштовхування філаментів.

На рис. 5 показано спектри осьової емісії при різних довжинах єдиного філаменту, збудженого двома пучками загальною енергією 2,4 мкДж і кутом перетину  $1,5^\circ$ . Як можна бачити, починаючи з довжини єдиного філаменту 560 мкм, на довжинах хвиль  $\lambda_S = 826,0$  нм і  $\lambda_A = 811,0$  нм з'являються нові стоксовий і антистоксовий піки однаково віддалені від довжини хвилі збудження  $\lambda_0 = 818,5$  нм. Ми вважаємо, що ці піки генеруються в процесі чотирихвильового змішування в високоінтенсивному ядрі філаменту, в якому рекомбінація двох лазерних фотонів народжує стоксовий і антистоксовий фотони (див. вставку на рис. 5). Дисперсія показника заломлення сапфіру робить можливою виконання законів збереження енергії і хвильового вектора в такому процесі:

$$2\mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_S + \mathbf{k}_A, \quad (1)$$

$$2\hbar\omega_0 = \hbar\omega_S + \hbar\omega_A. \quad (2)$$

Дійсно, розв'язок системи рівнянь (1) і (2) з використанням табличних даних для показника заломлення сапфіру, і вимірних довжин хвиль  $\lambda_S$ ,  $\lambda_A$ , і  $\lambda_0$ , показує, що  $\alpha = 0,72^\circ$ , а  $\beta = 0,7^\circ$ . Це добре узгоджується з експериментальною величиною  $0,75^\circ$  кута між пучком накачки і віссю  $Z$ .

#### 4. Висновки

Таким чином, експериментально досліджено взаємодію двох фемтосекундних філаментів у монокристалічному сапфірі при різних енергіях імпульсу, кутах перетину і різницях фаз. Показано, що в зоні перетину енергетичних резервуарів можуть бути сформовані як регулярна мультифіламентна структура, так і єдиний філамент. Продемонстрований контроль МФС шляхом зміни фазового зсуву між взаємодіючими променями. Поблизу від області МФС внаслідок суперпозиції інтерференційних смуг малого контрасту власного розподілу інтенсивності світлового поля збуджуючих променів спостережено як притягування, так і відштовхування філаментів. Осьова емісія єдиного філа-

мента, сформованого в зоні перекриття енергетичних резервуарів, утворюється в процесі невідомого чотирихвильового змішування.

*Роботу виконано з використанням методичних можливостей лазерного фемтосекундного центру для колективного користування НАН України. Автори вдячні за фінансову підтримку ДФФД України (проект Ф53/199) і Українського науково-технологічного центру (проект 5721).*

1. D.M. Krol, J. Non-Cryst. Sol. **354**, 416 (2008).
2. A. Couairon and A. Mysyrowicz, Phys. Rep. **441**, 47 (2007).
3. L. Bergé, S. Skupin, F. Lederer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92(22)**, 225002-4 (2004).
4. S. Skupin, L. Berg, U. Peschel *et al.*, Phys. Rev. E **70**, 046602-15 (2004).
5. A.C. Bernstein, M. McCormic, G.M. Dyer, J.C. Sanders, and T. Ditmire, Phys. Rev. Lett. **102(12)**, 123902-4 (2009).
6. J. Wu, T. Xuan, X. Yang, H. Gai, P. Lu, H. Pan, and H. Zeng, Opt. Lett. **34(20)**, 3211-3 (2009).
7. S. Tzortzakakis, L. Berge, A. Couairon, M. Franco, B. Prade, and A. Mysyrowicz, Phys. Rev. Lett. **86(24)**, 5470 (2001).
8. H. Cai, J. Wu, P. Lu, X. Bai, L. Ding, and H. Zeng, Phys. Rev. A **80(5)**, 058102-4 (2009).
9. H. Zeng, X. Yang, J. Wu, Y. Peng, Y. Tong, P. Lu, L. Ding, and Z. Xu, Opt. Lett. **34(24)**, 3806 (2009).
10. T. Xi, X. Lu, and J. Zhang, Phys. Rev. Lett. **96**, 025003-4 (2006).
11. C. Corsi, A. Tortora, and M. Bellini, Appl. Phys. B **78(3-4)**, 299 (2004).

Одержано 16.01.2014

*И.В. Блонский, В.Н. Кадан, О.И. Шпотюк  
П.И. Коренюк, В.М. Пузиков, Л.А. Гринь*

#### ФИЛАМЕНТАЦИЯ В ОБЛАСТИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ДВУХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЛУЧЕЙ В САПФИРЕ

##### Резюме

Исследовано явление филаментации при пересечении двух фемтосекундных лазерных лучей в монокристаллическом сапфире. Определены условия образования регулярной мультифиламентной структуры (МФС), параметры которой зависят от энергии импульса, угла пересечения и разности фаз между двумя возбуждающими лучами. Впервые, как отдельную реализацию МФС, исследован процесс формирования одинарных филаментов при действии двух разных лучей возбуждения. Продемонстрировано, что число филаментов в МФС зависит от количества интерференционных максимумов в области пересечения лучей, мощность которых превышает критическую мощность самофокусировки. Обращено внимание на возможность управления

мультифиламентной структурой путем изменения разности фаз между взаимодействующими лучами. Обнаружены оптические проявления “притягивающего” и “отталкивающего” характера взаимодействия филаментов. Изучен спектр осевого излучения одинарного филамента зависимости от его длины. Показано, что в формировании осевого спектра его излучения определяющую роль играет процесс четырехволнового смешивания.

*I.V. Blonskyi, V.M. Kadan, O.Y. Shpotyuk,  
P.I. Korenyuk, V.M. Puzikov, L.O. Gryn'*

#### FILAMENTATION IN THE INTERSECTION REGION OF TWO FEMTOSECOND LASER BEAMS IN SAPPHIRE

#### S u m m a r y

The filamentation phenomenon arising at the intersection of two femtosecond laser beams in a sapphire single crystal has

been studied. Conditions for a regular multifilament structure (MFS) to emerge with the parameters depending on the pulse energy, intersection angle, and phase difference between two exciting beams are determined. For the first time, the formation of a single filament under the action of two different excitation beams is analyzed as an MFS implementation. The number of filaments in the MFS is demonstrated to depend on the number of interference maxima in the intersection region of beams, the power of which exceeds the critical power of self-focusing. Attention is paid to the possibility to control the multifilament structure by varying the phase difference between the interacting beams. Optical manifestations of the interaction between the filaments with the “attractive” or “repulsive” character are observed. The spectrum of the axial emission by a single filament, as well as its dependence on the filament length, is studied, and the process of four-wave mixing is shown to play a key role in its formation.