

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ КЕРУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО СУПЕРКОНТИНУУМУ

Н.М. КАЧАЛОВА, В.С. ВОЙЦЕХОВИЧ, А.М. БОРОДІН, Л.П. ЯЦЕНКО

УДК 535  
© 2010

Інститут фізики НАН України  
(Просп. Науки, 46, Київ 03028; e-mail: [kachalova.nataliya@gmail.com](mailto:kachalova.nataliya@gmail.com))

---

Отримано генерацію суперконтинууму в спектральному інтервалі 530–1100 нм у типоряді мікроструктурованих фотонно-кристалічних волокон при накачці випромінюванням фемтосекундного Ti:S лазера Mira Optima 900-F. Досліджено еволюцію спектральних характеристик фемтосекундного суперконтинууму від довжини хвилі та потужності випромінювання накачки, а також поляризаційні характеристики суперконтинууму. Експериментально продемонстровано можливості керування характеристиками фемтосекундного суперконтинууму.

---

### 1. Вступ

Генерація суперконтинууму (СК) являє собою формування широкого неперервного спектра методом поширення імпульсів високої потужності через нелінійне середовище й уперше спостерігалася в 1970 р. Альфано й Шапіро [1, 2]. Термін “суперконтинуум” не має на увазі певного ефекту, а означає різні нелінійні ефекти (НЛ), які в комбінації приводять до найсильнішого розширення імпульсу і являє собою неперервний набір спектральних компонент електромагнітної хвилі з властивостями лазерного випромінювання, тобто СК – це просторово когерентне “біле” світло.

За умови достатньої потужності генерація СК може спостерігатися в краплі води, але НЛ ефекти, що беруть участь у формуванні спектрального розширення сильно залежать від дисперсії середовища й розробка диспергируючого матеріалу може суттєво зменшити вимоги до потужності. Найбільш широкі спектри спостерігаються, коли імпульси накачки по довжині хвилі близькі до довжини хвилі нульової дисперсії нелінійного середовища.

Введення випромінювання фемтосекундного лазера в нелінійне мікроструктуроване волокно (PCF) з довжиною хвилі близької до нульової дисперсії приводить до генерації фемтосекундного СК [3, 4]. Перший опис генерації суперконтинууму в оптичних волокнах PCF був зроблений Ранка та ін. [1] в 1999 році. До фундаментальних фізичних процесів, які лежать в основі генерації СК в PCF відносять: вимушене раманівське розсіяння [5], чотирихвильове змішування [6, 7] та фазову самомодуляцію [8], розпад солітонів [9] та інші.

Необхідність у широкосмуговому когерентному випромінюванні СК виникає при вирішенні різноманітних задач: нанотехнологій, метрології, біомедицини, спектроскопії, мікроскопії ближнього та ін. Однак різні прикладні задачі ставлять різні вимоги стосовно характеристик СК. Так, наприклад, для метрології оптичних частот необхідний СК з шириною спектра не меншою від однієї октави, що характеризується високою стабільністю амплітуди та фази. Для реалізації фемтосекундної КАРС достатньо виділення певного вузького стабільного та інтенсивного частотного інтервалу СК. Одним з підходів до створення універсального генератора СК є розробка методів динамічної зміни параметрів СК.

У рамках досліджень було отримано генерацію СК у мікроструктурованих PCF при накачці випромінюванням фемтосекундного Ti:Sapphire лазера Mira Optima 900-F та досліджено його характеристики.

### 2. Мікроструктуровані волокна

Генерація суперконтинууму нами була досягнена в оптоволокну типу фотонний кристал. Дані волокна

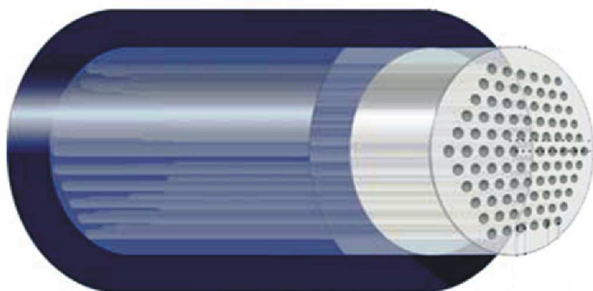


Рис. 1. Схематичне зображення мікроструктурованого волокна

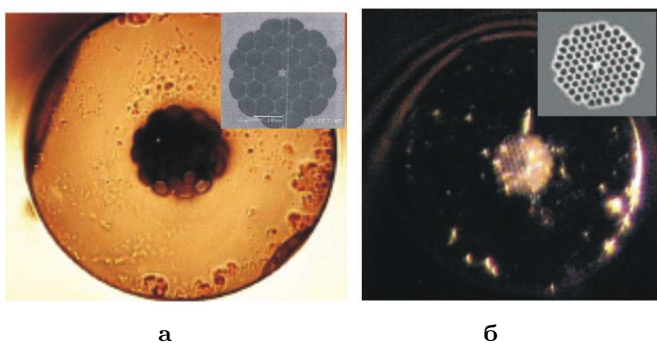


Рис. 2. Фото поперечних перерізів PCF: *а* – Thorlabs NL-2,4-800 та *б* – H 071015125, зроблені за допомогою поляризаційного мікроскопа Olympus BX-51(400x) після нетривалої експлуатації, на вставках – надані виробником

належать до класу мікроструктурованих оптичних волокон і є кварцевими мікроструктурами з періодичною системою циліндричних повітряних трубок, які оточують кварцеву серцевину.

Якщо в стандартних оптичних волокнах повне внутрішнє відбивання забезпечується при умовах, коли показник заломлення оболонки волокна є меншим за показник заломлення серцевини, то в мікроструктурованому волокні хвильоводні моди формуються за рахунок інтерференції хвиль, які відбиваються та розсіюються на мікронеоднорідностях показника заломлення. Для широкого класу мікроструктурованих волокон умова існування хвильоводних мод у серцевині волокна, яка може розглядатися як дефект мікроструктури, може бути записана у вигляді, аналогічному існуванню повного внутрішнього відбивання у звичайному волокні:  $n_{\text{clad}} < n_{\text{core}}$ . Поряд із звичайними хвильоводними режимами, які забезпечуються повним внутрішнім відбиванням, у мікроструктурованих волокнах підтримуються хвильоводні моди електромагнітного випромінювання, які формуються за рахунок високої відбивальної здатності оболонки волокна в області двовимірної

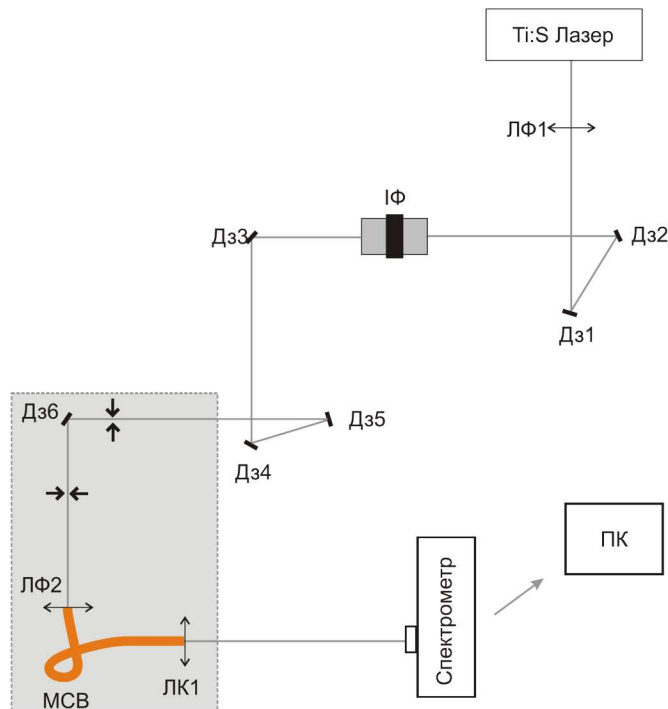


Рис. 3. Блок-схема генератора фемтосекундного суперконтинууму: Ti:S – фемтосекундний лазер Mira Optima 900-F, ІФ – оптичний ізолятор Фарадея, Дз – набір дзеркал, ЛФ – фокусуєчі лінзи, ЛК – колімуюча лінза, спектрометр – Spectrometer Ocean Optics Usb 4000

періодичної мікроструктури (двовимірного фотонного кристала), схематично наведеної на рис. 1.

PCF мають унікальні нелінійні властивості, зокрема, щодо можливості вибору їх дисперсійних характеристик. Підбором параметрів волокна (показника заломлення матеріалу волокна, розмірів серцевини та оболонки) можна досягти нульової дисперсії групової швидкості для заданої довжини хвилі. Це приводить до радикального збільшення ефективності нелінійної взаємодії та дозволяє спостерігати нові нелінійно-оптичні явища. У роботі було використано PCF Thorlabs NL-2,4-800 та H 071015125, зображені на рис. 2, які мають нульову дисперсію на довжині хвилі 800 нм. Волокно Thorlabs NL-2,4-800 має ядро діаметром 2,4 мкм, а волокно H 071015125 – 2,5 мкм.

### 3. Експериментальна установка

Отримання лазерного фемтосекундного випромінювання забезпечувалось лазерним фемтосекундним комплексом (Coherent Mira Optima 900-F) НАНУ при Інституті фізики НАНУ. Схема експериментальної установки зображена на рис. 3.

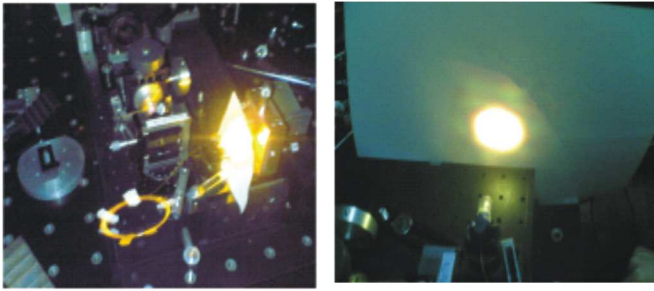


Рис. 4. Мультиплексне перетворення частоти в мікструктурованому волокні

- Базові функціональні параметри комплексу:
- мінімальна тривалість імпульсу  $\tau = 70$  фс;
  - максимальне значення енергії імпульсу  $W = 2,5$  МДж;
  - максимальна пікова потужність  $P = 3 \cdot 10^{11}$  Вт;
  - максимальна інтенсивність випромінювання  $I_0 = 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>;
  - частота повторення імпульсу 76 МГц.

На рис. 4 зображено типовий вигляд випромінювання ближнього поля на виході мікструктурованого волокна.

#### 4. Генерація суперконтинууму у мікструктурованих волокнах

Визначальними факторами для генерації СК є дисперсія волокна стосовно довжини хвилі накачки, тривалості імпульсу й пікової потужності. Дисперсія, і особливо знак дисперсії, визначає тип НЛ ефектів, що формують СК, і, в остаточному підсумку, на вигляд спектра – тобто спектральну форму та стабільність. Волокна Thorlabs NL-2,4-800 та Н 071015<sub>1</sub>25 спроектовано з нульовою дисперсією на довжині хвилі 800 нм. В області нормальної дисперсії, де довжина хвилі накачки менша за область нульової дисперсії, домінує фазова самомодуляція з раманівським розсіюванням, що розширює в довгохвильову частину спектра, швидкі імпульси розширюються в перших декількох сантиметрах волокна, що обмежує пікову вихідну потужність та спектральне розширення. В області аномальної дисперсії, де довжина хвилі накачки більша за довжину, що відповідає області нульової дисперсії, відбувається формування солітонів. У цій області слід очікувати ефективного перетворення вхідної енергії в суперконтинуум. Спектри вихідного випромінювання для різних потужностей накачки та довжини хвилі накачки наведено на рис. 5 та рис. 6.

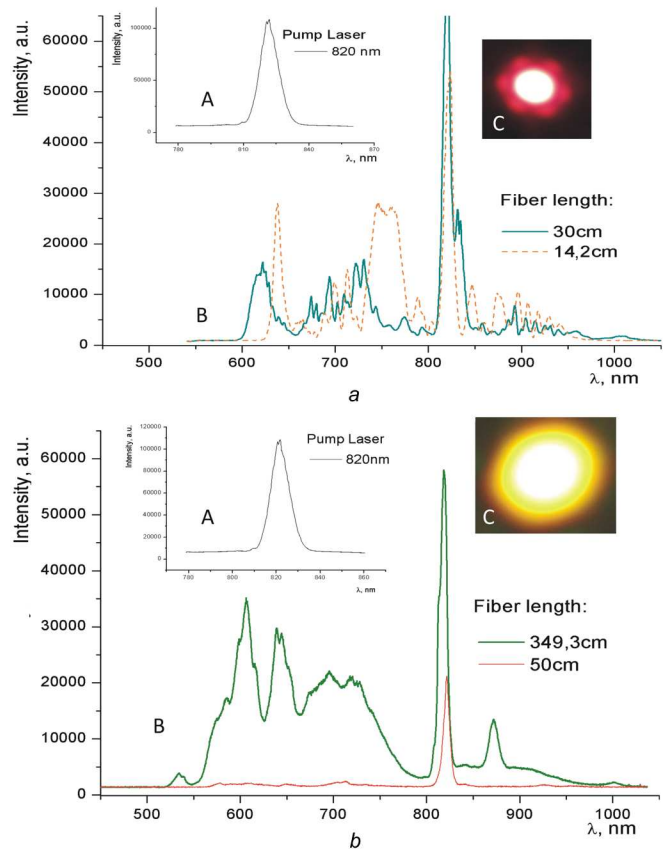


Рис. 5. Спектри випромінювання суперконтинууму, що генерується імпульсами фемтосекундного Ti:S лазера на довжині хвилі 820 нм з потужністю 500 мВт (А) у мікструктурованих фотонно-кристалічних волокнах: а – Thorlabs NL-2,4-800 довжиною 14,2 см та 30 см (В); б – Н 071015<sub>1</sub>25 довжиною 50 см та 349,3 см (В). На вставках (С) – експериментально зафіксовані розподіли інтенсивності випромінювання на виході з волокна

Як видно для 780 нм, область нормальної дисперсії, спектр суперконтинууму досить звужений, більша частина енергії концентрується навколо довжини хвилі накачки. Для 800 нм, область нульової дисперсії, спектр досить широкий і може бути використаний для різних задач. Для 820 нм, область аномальної дисперсії, найширший спектр.

#### 5. Поляризаційні характеристики суперконтинууму

Досліджено поляризаційні характеристики СК з використанням призми Глана-Тейлора. Отримано, що після проходження випромінювання фемтосекундного лазера крізь фотонно-кристалічне волокно поляризація змінюється з лінійної на еліптичну. Ступінь

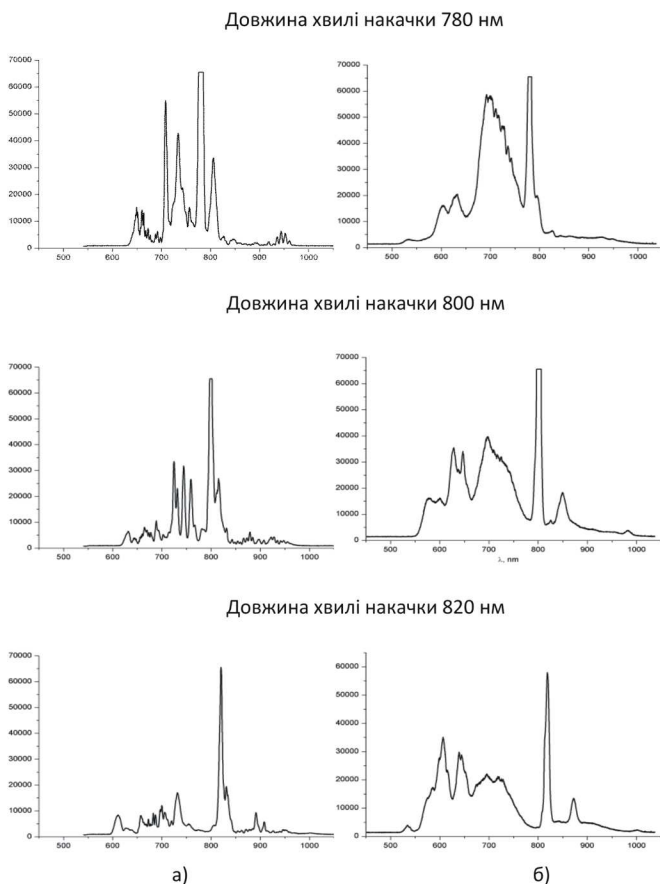


Рис. 6. Спектри суперконтинууму при потужності накачки 400 мВт: Thorlabs NL-2,4-800 довжиною 14,2 см та Н 071015125 довжиною 50 см

поляризації дорівнює 0,33. Отримані дані зображено на рис. 7.

Проаналізовано уширення спектра СК для кожної з компонент поляризації та отримано, що максимальне уширення спектра становило 385 нм при мінімальній потужності за поляризатором, а мінімальне уширення – 310 нм – при максимальній потужності за поляризатором. Проаналізовано зсув центральної компоненти ФС, залежно від кута повороту поляризатора. Отримано, максимальний зсув – 94 нм при мінімальній потужності за поляризатором, мінімальний зсув – 48 нм при максимальній потужності за поляризатором.

## 6. Висновки

Створено джерело СК на базі: фемтосекундного Ti:Sapphire лазера Coherent Mira Optima 900-F та мікροструктурованих фотонно-кристалічних воло-

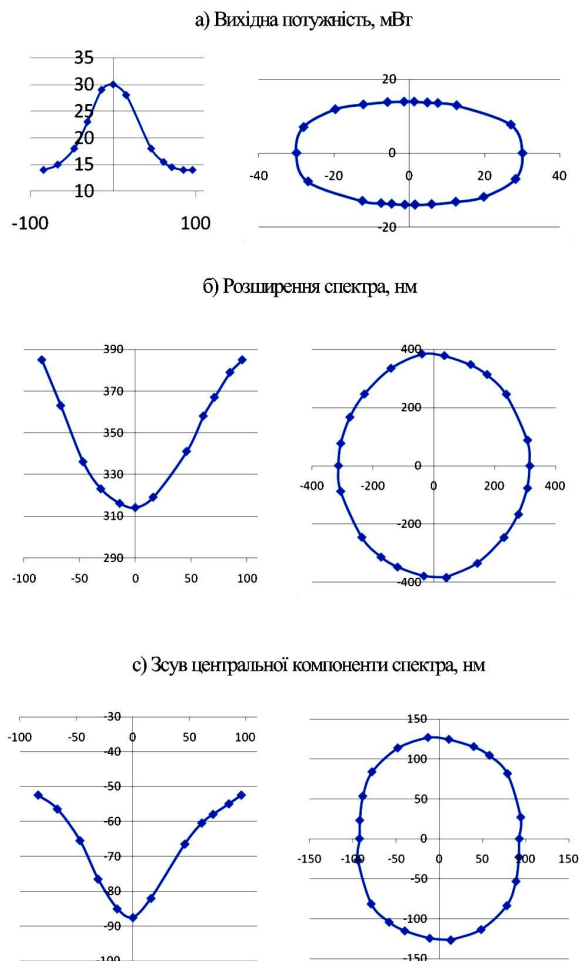


Рис. 7. Аналіз поляризації випромінювання на виході волокна. Відносні зміни характеристик випромінювання: а – потужності випромінювання; б – розширення спектра; в – зсув центральної компоненти випромінювання щодо довжини хвилі накачки представлені як функції кута повороту призми Глана-Тейлора

кон. Отримано генерацію СК у типоряді мікροструктурованих волокон при накачці випромінюванням Ti:Sapphire лазера на довжині хвилі 820 нм для волокон: Thorlabs NL-2,4-800 довжиною 30 см спектр СК перекриває 580–1000 нм та Н 071015125 довжиною 349,3 см спектр СК – 525–1100 нм. Досліджено еволюцію спектральних характеристик фемтосекундного СК від довжини хвилі накачки. Зміна довжини хвилі накачки фемтосекундного лазера проводилася в межах від 770–830 нм. Отримано, що зі збільшенням довжини хвилі накачки спектр розширюється в межах від 150–350 нм відповідно. Також досліджено еволюцію спектральних характеристик фемтосекундного СК від потужності випромінювання нака-

чки. Показано, що керування амплітудним та частотним зсувом бічних компонент, які генеруються в спектрі пробного поля на виході волокна, можливе за рахунок зміни потужності поля накачки. Досліджено поляризаційні характеристики СК з використанням призми Глана–Тейлора. Отримано, що після проходження випромінювання фемтосекундного лазера крізь фотонно-кристалічне волокно поляризація змінюється з лінійної на еліптичну. Ступінь поляризації дорівнює 0,33.

Таким чином, експериментально продемонстровано можливості керування характеристиками фемтосекундного суперконтинууму.

Робота виконана за підтримки комплексної програми фундаментальних досліджень “Наноструктурні системи, наноматеріали, нанотехнології”.

1. R.R. Alfano and S.L. Shapiro, Phys. Rev. Lett. **24**, 584 (1970).
2. R.R. Alfano and S.L. Shapiro, Phys. Rev. Lett. **24**, 592 (1970).
3. A.M. Zheltikov, Usp. Fiz. Nauk **147**, 73 (2004).
4. A.M. Желтиков, *Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики* (Физматлит, Москва, 2006).
5. J.K. Ranka, R.S. Windeler, and A.J. Stentz, Opt. Lett. **25**, 25 (2000).
6. S. Coen, A. Chau, R. Leonhardt *et al.*, J. Opt. Soc. Am. **119**, 753 (2002).
7. W.J. Wadsworth *et al.*, Optics Express **12**, 299 (2004).
8. Z. Zhu *et al.*, Optics Express **12**, 689 (2004).
9. K. Sakamaki *et al.*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **10**, 876 (2004).

Одержано 20.07.10

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО СУПЕРКОНТИНУУМА

*Н.М. Качалова, В.С. Войцехович, А.М. Бородин, Л.П. Яценко*

### Резюме

Получена генерация суперконтинуума в спектральном диапазоне 530–1100 нм в типоряде микроструктурированных фотонно-кристаллических волокон при накачке излучением фемтосекундного Ti:S лазера Mira Optima 900-F. Исследована эволюция спектральных характеристик фемтосекундного суперконтинуума от длины волны и мощности излучения накачки, а также поляризационные характеристики суперконтинуума. Экспериментально продемонстрирована возможность управления характеристиками фемтосекундного суперконтинуума.

## INVESTIGATION OF POSSIBILITIES TO CONTROL FEMTOSECOND SUPERCONTINUUM CHARACTERISTICS

*N.M. Kachalova, V.S. Voitsekhovich, A.M. Borodin, L.P. Yatsenko*

Institute of Physics, Nat. Acad. of Sci. of Ukraine  
(46, Prosp. Nauky, Kyiv 03028, Ukraine;  
e-mail: kachalova.nataliya@gmail.com)

### Summary

The generation of a supercontinuum in the spectral range 530–1100 nm in a series of photon-crystal fibers pumped by a femtosecond Ti:S laser Mira Optima 900-F is obtained. The evolution of spectral characteristics of the femtosecond supercontinuum depending on the pump pulse wavelength and the power radiation is studied. The polarization characteristics of spectral components of the supercontinuum are analyzed. The possibility of a control over the femtosecond supercontinuum generation is experimentally demonstrated.