

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ІНТЕНСИВНОСТІ СКЛАДОВИХ ВИМУШЕНОГО КОМБІНАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ У СПЕКТРІ СУПЕРКОНТИНУУМУ ВІД МАКРОСКОПІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Для вимушеного комбінаційного розсіювання у спектрі фемтосекундного суперконтинууму отримано залежність його інтенсивності від макроскопічних параметрів мікроструктурованого волокна. Наведено результати експериментів з дослідження впливу параметрів випромінювання накачки на інтенсивність розсіювання.

Ключові слова: суперконтинуум, вимушене комбінаційне розсіювання, мікроструктуроване волокно, фотонний кристал, фемтосекундний лазер.

1. Вступ

Випромінювання суперконтинууму (СК) отримують під час пропускання надкоротких лазерних імпульсів крізь оптично прозорі середовища. Одним із методів генерації СК є пропускання лазерних імпульсів крізь мікроструктуровані (МС) волокна.

МС волокна — це хвилеводні структури нового покоління, які забезпечують великі довжини нелінійно-оптичної взаємодії лазерних імпульсів [1] із достатньо високою інтенсивністю, даючи можливість радикально знизити вимоги щодо потужності лазерного випромінювання, необхідного для генерації суперконтинууму. Інтенсивність випромінювання суперконтинууму, сформованого у МС волокнах, як правило, суттєво нижча інтенсивності білого світла, згенерованого потужними сфокусованими лазерними імпульсами у газових середовищах. Однак МС волокна дають змогу отримати випромінювання суперконтинууму зі спектром, який перекидає більшу частину видимого спектра [2] або навіть весь видимий діапазон й частину ІЧ-діапазону під час використання імпульсів з характерною піковою потужністю близько 1 кВт.

До основних фізичних процесів генерації СК у МС волокнах належать різні нелінійно-оптичні явища: фазова самомодуляція (ФСМ), фазова крос-модуляція (ФКМ), чотирихвильове змішування, вимушене комбінаційне розсіювання (ВКР) світла та ін.

Потреба в широкопasmовому когерентному випромінюванні — суперконтинуумі — виникає під час розв'язання різноманітних задач нанотехнологій, оптичних комунікацій, метрології, біомедицини, спектроскопії та інших прикладних задач. Однак кожна з цих задач вимагає різних характеристик випромінювання [3, 4].

У статтях [1, 5] було розглянуто внесок ефек-

тів ФСМ, ФКМ, чотирихвильове змішування на спектральні суперконтинууму. Задача оцінки ефекту ВКР на процес генерації широкопasmового СК досі актуальна. Мета цієї праці — дослідження впливу макроскопічних параметрів випромінювання накачки та МС волокна на інтенсивність складових ВКР у спектрі СК.

2. Вимушене комбінаційне розсіювання

Комбінаційне розсіювання — процес непружного розсіювання світла (рис. 1 а). Падаючий квант світла $\hbar\omega_L$ розсіюється у вигляді кванта $\hbar\omega_s$, при цьому різниця енергій $\hbar(\omega_L - \omega_s) = \hbar\omega_{ba}$

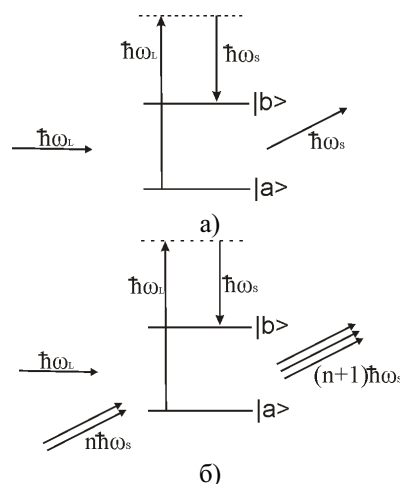


Рис. 1. Схема а) спонтанного та б) вимушеного комбінаційного розсіювання світла як квантового процесу

поглинається центром речовини, що розсіює світло. Частоту ω_s називають стоксовою; вона менша за частоту падаючого світла на величину, яка дорівнює частоті збудженої розсіюючої системи. Якщо світло падає на систему в збудженому стані, то ця система може перейти у незбуджений

стан внаслідок розсіювання світла. У цьому випадку розсіяне світло містить антистоксові частоти ω_{as} , які більші за частоти падаючого світла $\omega_{as} = \omega_L + \omega_{ba}$.

Процес вимушеного комбінаційного розсіювання схематично представлено на рис. 1 б. У цьому випадку одночасно зі світловою хвилею частоти ω_L на розсіюючу систему падає світлова хвиля частоти ω_s . Квант $\hbar\omega_L$ додається до хвилі частоти ω_s , яка внаслідок цього підсилюється; падаючий світловий пучок втрачає квант $\hbar\omega_L$, а система збуджується на величину кванта $\hbar(\omega_L - \omega_s)$ [6].

3. Вимушене комбінаційне розсіювання у мікроструктурованих волокнах

Ефект ВКР під час проходження лазерних імпульсів у МС волокнах виникає через модуляцію лазерного випромінювання молекулярними коливаннями середовища. Висока інтенсивність і направленість випромінювання, яка виникає внаслідок ВКР, пов'язані з тим, що вимушене розсіювання світла відбувається на коливаннях молекул, збуджених і сфазованих світлом у великому об'ємі середовища [7].

ВКР призводить до розширення спектра у довгохвильову (стоксову) область. В умовах стандартних оптичних волокон ВКР не спричинює суттєве підсилення видимої частини спектру суперконтинууму.

3.1. Теоретична частина. Щоб знайти поріг ВКР, необхідно розглянути систему взаємодії між хвилею накачки та стоксовою хвилею. Ця взаємодія підпорядковується системі двох зв'язаних рівнянь [8]:

$$\frac{dI_s}{dz} = gI_p I_s - \alpha_s I_s, \quad (1)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} gI_p I_s - \alpha_p I_p, \quad (2)$$

де I_s — інтенсивність стоксової хвилі, I_p — інтенсивність накачки, g — коефіцієнт підсилення ВКР, ω_p — частота накачки, ω_s — частота стоксової хвилі, α_p — коефіцієнт втрат на частоті накачки, α_s — коефіцієнт втрат на стоксовій частоті.

Нескладно перевірити, що за відсутності втрат

$$\frac{d}{dz} \left(I_s + \frac{\omega_s}{\omega_p} I_p \right) = 0. \quad (3)$$

Це рівняння означає, що число фотонів під час ВКР залишається сталим.

Хоча для повного опису процесу ВКР зменшення інтенсивності хвилі накачки через відтік енергії у стоксову хвилю (виснаження накачки) повинно бути враховано, під час оцінки порогу ВКР цим

можна знехтувати [9]. Якщо у рівнянні (2) відкинути перший доданок, який відповідає за виснаження накачки, воно легко розв'язується. Підставивши розв'язок у рівняння (1), отримаємо

$$\frac{dI_s}{dz} = gI_0 \exp(-\alpha_p z) I_s - \alpha_s I_s, \quad (4)$$

де I_0 — початкова інтенсивність накачки при $z = 0$. Результатом інтегрування (4) є

$$I_s(l) = I_s(0) \exp(gI_0 l_{\text{eff}} - \alpha_s l), \quad (5)$$

де $l_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p l)]/\alpha_p$ — ефективна довжина волокна.

Інтенсивність сигналу ВКР, як видно з формул (5) та l_{eff} , визначається коефіцієнтом ВКР-підсилення, інтенсивністю випромінювання накачки і коефіцієнтом втрат на частотах випромінювання та стоксового сигналу [7, 8]. На практиці ВКР виникає зі спонтанного КР, яке виникає у всьому волокні. Можна розрахувати потужність стоксової хвилі, якщо розглянути підсилення кожної частотної компоненти з енергією $\hbar\omega$ відповідно до (5) і проінтегрувати по всьому спектру комбінаційного підсилення. В результаті отримаємо:

$$P_s = P_{\text{so}}^{\text{eff}} \exp(g(\omega_s) I_0 l_{\text{eff}} - \alpha_s l), \quad (6)$$

де ефективна вхідна потужність при $z = 0$,

$$P_{\text{so}}^{\text{eff}} = \hbar\omega_s B_{\text{eff}}, \quad (7)$$

$$B_{\text{eff}} = \sqrt{2\pi} \left| I_0 l_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial \omega^2} \right)_{\omega=\omega_s} \right|, \quad (8)$$

де B_{eff} — за фізичним змістом, ефективна ширина смуги стоксового випромінювання з центром у піку підсилення при $\omega = \omega_s$.

Поріг ВКР визначається як потужність накачки на початку світловода, за якої на виході світловода потужність стоксової хвилі стає рівною потужності накачки, або:

$$P_s = P_p = P_0 \exp(-\alpha_p l), \quad (9)$$

де $P_0 = I_0 A_{\text{eff}}$ — вхідна потужність накачки, A_{eff} — ефективна площа серцевини волокна. Використовуючи рівняння (6) та (9), отримуємо умову порогу потужності для багатомодового волокна:

$$P_{\text{so}}^{\text{eff}} \exp(gP_0 l_{\text{eff}}/A_{\text{eff}}) = P_0. \quad (10)$$

Розв'язок рівняння (10) дає критичну потужність накачки, необхідну для досягнення порогу ВКР. У наближенні Лоренцової форми спектра підсилення критична потужність підсилення з доброю точністю задається виразом

$$gP_0^{\text{cr}} l_{\text{eff}}/A_{\text{eff}} \approx 16. \quad (11)$$

Коли стоксова хвиля йде назустріч хвилі накачки, критичну потужність задають аналогічним виразом, але числовий фактор 20, а не 16 [8].

3.2. Аналітичне моделювання. Актуальним є дослідження інтенсивності складових ВКР від макроскопічних параметрів волокна. Записавши коефіцієнт втрат α_p та використовуючи формулу (5), можна досліджувати інтенсивність ВКР залежно від довжини волокна, діаметра сердцевини та показника заломлення.

$$\alpha_p = \left(\frac{u_{mn}}{2\pi} \right)^2 \frac{\lambda^2}{d^3} \frac{n^2 + 1}{\sqrt{n^2 - 1}}, \quad (12)$$

де n — показник заломлення сердцевини, d — діаметр сердцевини волокна, λ — довжина хвилі. Аналітичне моделювання проводилося за допомогою програмного забезпечення Maple 14. Результати моделювання (залежність інтенсивності ВКР сигналу від показника заломлення, від діаметра сердцевини, від довжини волокна) показані на рис. 2–4.

Як видно з рис. 2, інтенсивність ВКР сигналу зростає до певного максимального значення n_{\max} показника заломлення, після чого знову починає плавно спадати. За розрахунками максимальна інтенсивність сигналу ВКР спостерігається при $n_{\max} = 1,73$ для всіх довжин хвиль. Найбільшої ін-

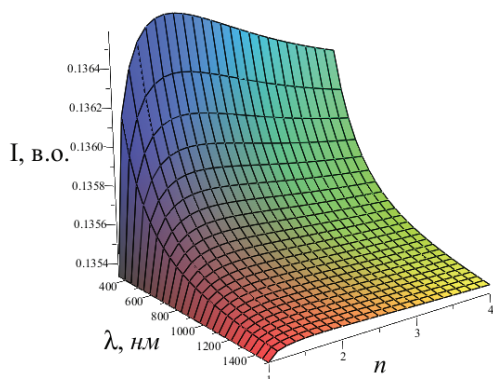


Рис. 2. Залежність інтенсивності ВКР сигналу від показника заломлення для $d = 2,5$ мкм, $l = 20$ см, $\alpha_s = 0,1$ см⁻¹, $u_{mn} = 2,4$, $I_{0g} = 0,3$ см⁻¹

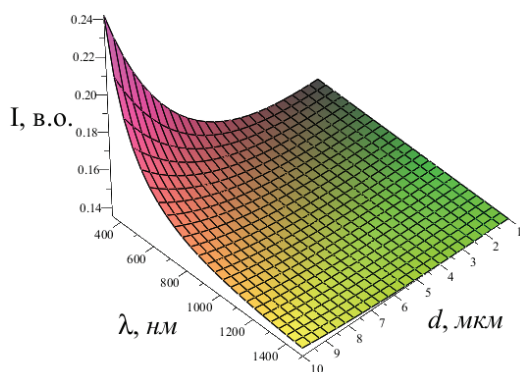


Рис. 3. Залежність інтенсивності ВКР сигналу від діаметра сердцевини для $n = 1,54$, $l = 20$ см, $\alpha_s = 0,1$ см⁻¹, $u_{mn} = 2,4$, $I_{0g} = 0,3$ см⁻¹

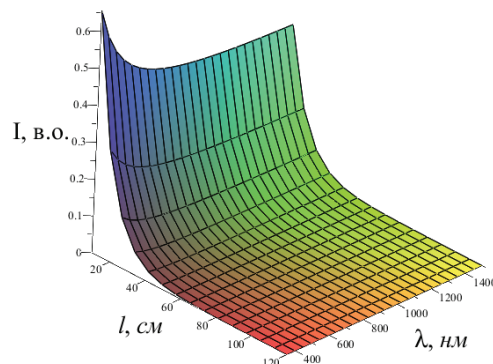


Рис. 4. Залежність інтенсивності ВКР сигналу від довжини волокна для $n = 1,54$, $d = 2,5$ мкм, $\alpha_s = 0,1$ см⁻¹, $u_{mn} = 2,4$, $I_{0g} = 0,3$ см⁻¹

тенсивності сигналу ВКР набуває у короткохвильовому діапазоні, а під час збільшення довжини хвилі інтенсивність спадає за експоненціальним законом.

Із рис. 3 бачимо, що збільшення діаметра волокна призводить до зростання інтенсивності ВКР сигналу за експоненціальним законом.

На рис. 4 показано, що при збільшенні довжини волокна інтенсивність ВКР сигналу спадає за експоненціальним законом. За довжини волокна понад 60 см ВКР сигнал майже не спостерігається.

3.3. Експериментальна частина. Експериментальні дослідження проводилися в Інституті фізики НАНУ на базі відділу квантової та когерентної оптики. Блок-схему експериментальної установки зображено на рис. 5.

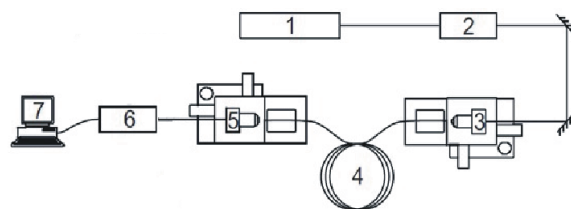


Рис. 5. Блок-схема експериментальної установки з реєстрації сигналу суперконтинууму:

1 — фемтосекундний Ti:Sapphire лазер MiraOptima 900-F; 2 — оптичний ізолятор на ефекті Фарадея; 3 — об'єктив; 4 — МС волокно NL-2,4-800; 5 — коліматор; 6 — спектрометр OceanOptics USB 4000; 7 — персональний комп'ютер

Фемтосекундне лазерне випромінювання надавалося лазерним фемтосекундним комплексом НАН України при Інституті фізики НАН України. Базові функціональні параметри комплексу:

- мінімальна тривалість імпульсу ~ 100 фс;
- максимальне значення енергії імпульсу $W \sim 6,5$ нМДж;
- максимальна пікова потужність $P_{\max} \sim 65$ кВт;
- частота повторення імпульсу 76 МГц.

Характеристики МС волокна Thorlabs марки NL-2,4-800:

- діаметр сердцевини волокна $2,4 \pm 0,1$ мкм;
 - довжина хвилі нульової дисперсії 800 нм;
 - діаметр повітряних отворів $2,9 \pm 0,1$ мкм.
- Поперечний переріз волокна зображено на рис. 6.

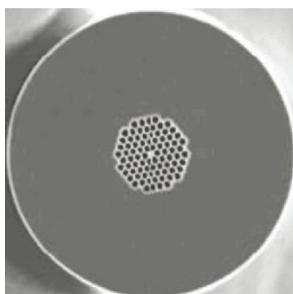


Рис. 6. Поперечний переріз МС волокна Thorlabs типу фотонного кристалу марки NL-2,4-800

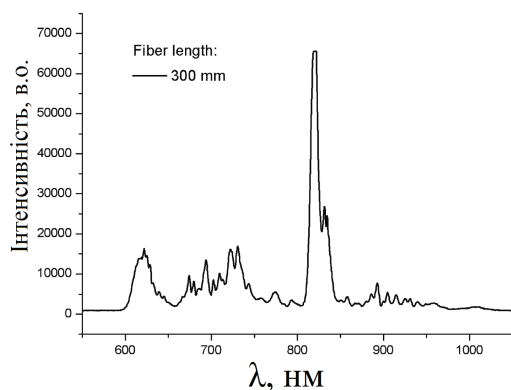


Рис. 7. Спектр випромінювання суперконтинууму згенерований імпульсами фемтосекундного Ti:Sapphire лазера на довжині хвилі 800 нм, потужністю 800 мВт у МС волокні NL-2,4-800 довжиною 30 см

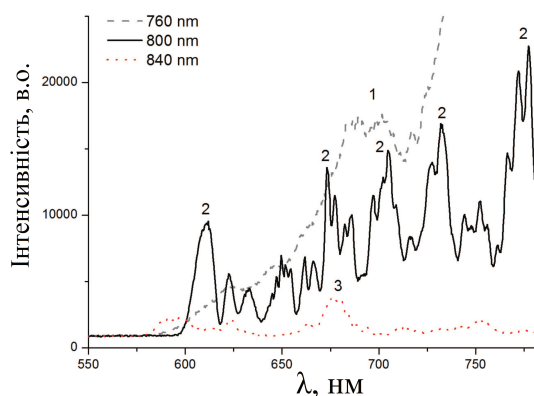


Рис. 8. Інтенсивність ВКР сигналу залежно від λ — довжини хвилі накачки Ti:Sapphire лазером МС волокна $d = 2,5$ мкм, $l = 30$ см й потужності 800 мВт: 1) $\lambda = 760$ нм; 2) $\lambda = 800$ нм; 3) $\lambda = 840$ нм

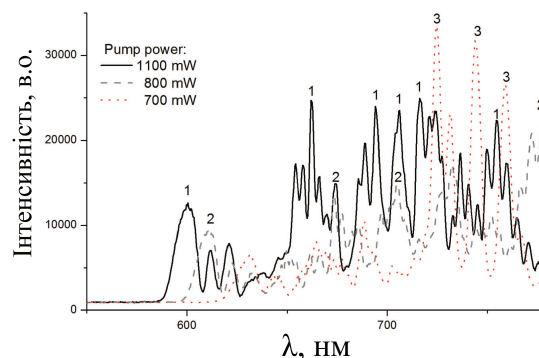


Рис. 9. Інтенсивність ВКР сигналу в залежності від P — потужності накачки Ti:Sapphire лазером МС волокна $d = 2,5$ мкм, $l = 30$ см, $\lambda = 800$ нм: 1) $P = 1100$ мВт; 2) $P = 800$ мВт; 3) $P = 700$ мВт

На рис. 7 представлено спектр випромінювання фемтосекундного суперконтинууму згенерованого імпульсами Ti:Sapphire лазера у МС волокні Thorlabs марки NL-2,4-800. На рис. 8 та рис. 9 наведено експериментально отримані залежності інтенсивності ВКР сигналу від довжин хвиль та потужностей накачки Ti:Sapphire лазером МС волокна $d = 2,5$ мкм та $l = 30$ см.

Аналіз спектрів СК (рис. 8 та рис. 9) показав, що зі збільшенням довжини хвилі накачки інтенсивність ВКР складової зменшується, а відтак добре корелює з результатами, отриманими за допомогою аналітичного моделювання (див. 3.2). Найширший і водночас найпологіший спектр ВКР сигналу досягається за довжини хвилі накачки 800 нм. Це можна пояснити нульовою дисперсією групової швидкості на цій довжині хвилі та підсиленням вкладу ефекту фазової самомодуляції [1]. Збільшення потужності накачки приводить до зменшення інтенсивності складової ВКР, тому можна зробити висновок, що для досягнення найширшого сигналу СК слід збільшувати потужність накачки, а для збільшення інтенсивності ВКР сигналу — зменшувати.

4. Висновки

Отже, зроблено спробу проаналізувати вплив макроскопічних параметрів: мікроструктурованого волокна (довжини, показника заломлення, діаметра сердцевини) та випромінювання накачки (довжини хвилі, потужності) на інтенсивність складових вимушеного комбінаційного розсіювання у спектрі суперконтинууму.

Аналітично з'ясовано, що інтенсивність ВКР складових фемтосекундного суперконтинууму:

- зростає зі збільшенням діаметра волокна;
- спадає зі збільшенням довжини волокна;
- зростає зі збільшенням показника заломлення матеріалу (з якого виготовлено волокно від $n = 1$

до $n_{\max} = 1,73$), а починаючи з $n_{\max} = 1,73$, плавно спадає.

Таким чином, результати аналітичного моделювання дають змогу чітко визначити умови спостереження інтенсивного сигналу ВКР складових, а саме ефективну довжину волокна l_{eff} при заданому діаметрі й показнику заломлення волокна.

Експериментально отримано:

- найширші складові ВКР у сигналі фемтосекундного суперконтинууму спостерігається на довжині накачки 800 нм, що пояснюється відсутністю дисперсії групової швидкості (для Thorlabs NL-2,4-800) та підсиленні внеску завдяки ефекту ФСМ;
- при збільшенні довжини хвилі накачки фемтосекундного лазерного випромінювання, починаючи з

800 нм, інтенсивність ВКР сигналу спадає.

Автори висловлюють подяку співробітникам Інституту фізики НАНУ: старшому науковому співробітнику, кандидату фіз.-мат. наук Н. М. Качаловій і науковому співробітнику, кандидату фіз.-мат. наук В. С. Войцеховичу за постановку задачі й допомогу в проведенні серії експериментів, а також корисні дискусії.

Роботу виконано за підтримки спільного гранту НАНУ та РФФД №42-02-12 та цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАНУ «Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій» на 2010–2014 рр.

Список літератури

1. Желтиков А. М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами / А. М. Желтиков // УФН. — 2006. — Т. 176. — № 6. — С. 623–649.
2. Lin C. New nanosecond continuum for excited state spectroscopy / C. Lin, R. H. Stolen // Appl. Phys. Lett. — 1976. — Vol. 28. — № 216. — P. 216–218.
3. Kachalova N. M. Investigation of possibilities to control femtosecond supercontinuum characteristics / N. M. Kachalova, V. S. Voitsekhovich, A. M. Borodin, L. P. Yatsenko // Ukrainian Journal of Physics. — 2010. — Vol. 55. — № 9. — P. 961–965.
4. Кобцев С. М. Волоконные генераторы суперконтинуума с расширенным набором управляемых параметров в реальном времени / С. М. Кобцев, С. В. Смирнов // Оптика и спектроскопия. — 2009. — Т. 107. — № 3. — С. 363–367.
5. Dudley J. M. Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber / J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen // Reviews of Modern Physics. — 2006. — Vol. 78. — № 4. — P. 1135–1184.
6. Бломберген Н. Вынужденное комбинационное рассеяние света / Н. Бломберген // УФН. — 1969. — Т. 97. — № 2. — С. 307–352.
7. Желтиков А. М. Оптика микроструктурированных волокон / А. М. Желтиков. — М.: Наука, 2004. — 281 с.
8. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Г. Агравал. — М.: Мир, 1996. — 324 с.
9. Smith R. G. Optical Power Handling Capacity of Low Loss Optical Fibers as Determined by Stimulated Raman and Brillouin Scattering / R. G. Smith // Applied Optics. — 1972. — Vol. 11. — № 11. — P. 2489–2494.

K. Yershov, V. Khomenko, Y. Bashkatov

INVESTIGATION OF MACROSCOPIC PARAMETER DEPENDENCE OF STIMULATED RAMAN SCATTERING INTENSITY IN SUPERCONTINUUM SPECTRUM

We consider stimulated Raman scattering in the spectrum of femtosecond supercontinuum. We obtain an analytical dependence of the scattering intensity on macroscopic parameters of microstructured fibers, and present experimental results of investigating pump radiation influence on the scattering intensity.

Keywords: supercontinuum, stimulated Raman scattering, microstructured fiber, photonic crystal, femtosecond laser.

Матеріал надійшов 19.03.2012