

Технические науки/6.Электротехника и радиоэлектроника

Вознюк В.А., Цирульник С.М., Осадчук О.В.

Вінницький національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ ФЕМТОСЕКУНДНИХ ЛАЗЕРІВ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Запропоновано спосіб збільшення пропускної здатності волоконних ліній зв'язку за рахунок використання надширокополосного випромінювання спектрального суперконтинуума, з формованого в нелінійних середовищах при поширенні в них фемтосекундних імпульсів. Аналіз літератури і чисельні розрахунки формування спектрального суперконтинуума в різних середовищах, включаючи фотонно-кристалічні волокна, показали можливість створення когерентного джерела, що генерує випромінювання в смузі частот УФ, видимого та ІЧ діапазонів спектру, що досягає 300...400 ТГц (350 нм...550 нм; 500 нм...1500 нм). Проведені оцінки можливої швидкості передачі інформації з використанням даних джерел і показано, що вона може досягати ~ 100 Тб / с.

В даний час системи передачі оптичних сигналів по волокну, засновані на мультиплексуванні по довжинах хвиль (wavelength - division multiplexing (WDM) [1]), є наступним логічним кроком до створення всесвітньої повністю оптичної інформаційної мережі. У простій системі WDM кілька модульованих сигналів з різними довжинами хвиль комбінуються оптичним мультиплексором в одиночне волокно, на вихідному кінці якого знаходиться демультиплексор, що розділяє широкосмуговий сигнал по довжинах хвиль. Для передачі інформаційного сигналу з щільністю 20 Гб/с необхідно поділ між частотними каналами не менше 100 ГГц, що відповідає приблизно 0,8 нм в діапазоні 1500...1600 нм, де найбільш низькі втрати у волокні, реалізується найменша дисперсія групових швидкостей і можливе використання ербієвих волоконних підсилувачів [1]. Якщо інтервал між частотними каналами менше 300 ГГц (2 нм), то як правило, такі системи WDM називаються щільними (dense WDM

(DWDM)) [2]. Для швидкостей передачі 2,5 Гб/с кількість переданих каналів по одиночному волокну подвоювалася щороку, починаючи з 1997 р., і до теперішнього часу досягло 160. Мабуть, рекордом є передача інформації з сумарною швидкістю 3,2 Тб/с по 160 каналам на відстань 1500 км системою, розробленою фірмою NEC (Японія) [3]. Слід зазначити, що в даній системі через кожні 40 км стояли підсилювачі - повторювачі оптичного сигналу. У проєкті TyCom Global Network [4], загальна протяжність волоконної мережі якої становить 250000 км, планується використовувати восьмиволоконний кабель з максимальним пропусканням 7,68 Тб / с. Подібні системи планується використовувати для так званих інтегрованих систем типу метро (рис. 1). Концепція даних систем відрізняється від звичайної ієрархічної телефонної мережі і використовує кільцеву структуру.

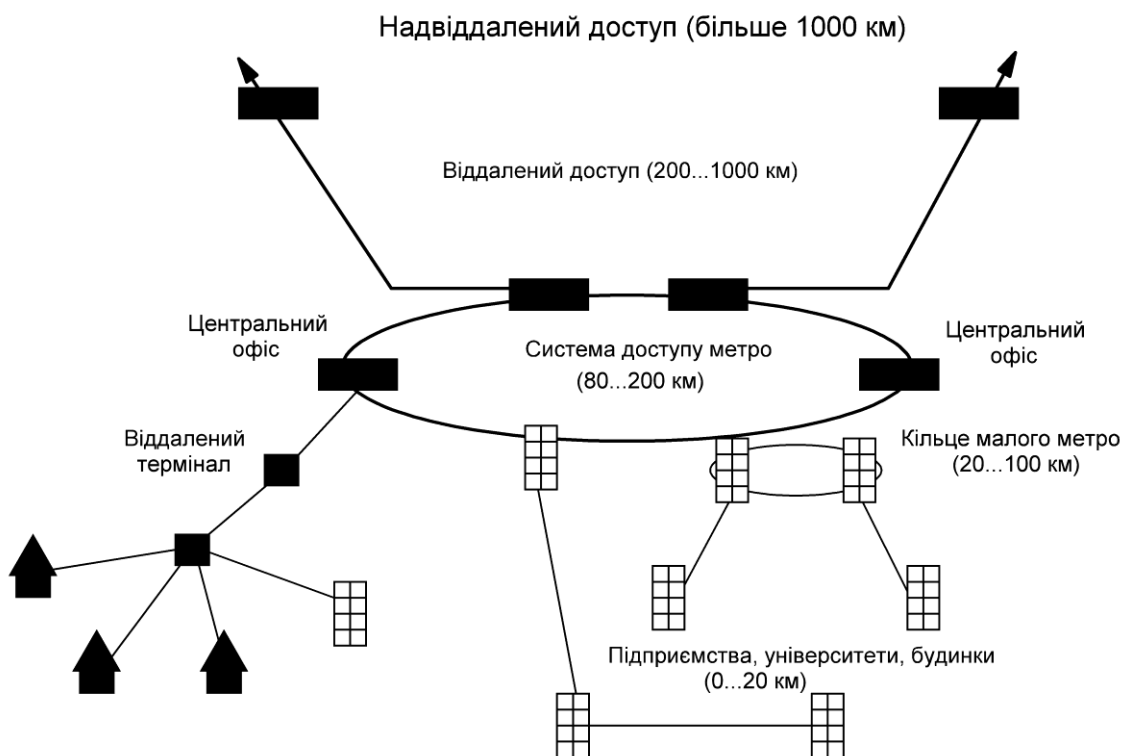


Рисунок 1 – Інтегрована система типу метро

По такими волоконним системам планується передача всієї можливої інформації, необхідної майбутньому споживачу: надшвидкісний доступ до Інтернету (не менше 100...1000 Мб/с), відеотелефон, інтерактивне телебачення високої чіткості, об'ємне (голографічне) телебачення. Для реалізації даних

систем у світових масштабах необхідна розробка способів, що дозволяють збільшити пропускну здатність одиночного волокна на 1...2 порядки. Одним з можливих шляхів тут є радикальне збільшення числа використовуваних частотних каналів шляхом застосування джерел випромінювання з надширокосмуговим, але когерентним випромінюванням. Таким випромінюванням на даний момент володіють джерела спектрального суперконтинуума, формованого в нелінійних середовищах при поширенні в них фемтосекундних імпульсів [5].

Явище надпоширення спектру надкоротких лазерних імпульсів (генерація спектрального суперконтинуума) пов'язано з одночасним протіканням багатьох нелінійно-оптичних процесів-фазової само- і кроссмодуляції, вимушеного комбінаційного розсіяння, чотирьох хвильового зміщення. Суворі теорія генерації спектрального суперконтинуума на основі рішення хвильового рівняння для напруженості електричного поля $E(t)$ з урахуванням електронної та електронно-коливальної нелінійності була запропонована в роботах [6]. Вона враховує практично всі явища, що протікають при генерації, а результати чисельних розрахунків на її основі дозволили кількісно розрахувати багато експериментів. Система рівнянь з урахуванням лінійної матеріальної і хвилеводної дисперсії має вигляд [7]:

$$\begin{cases} \frac{dE}{dz} - a \frac{d^3 E}{d\phi^3} + b \int_{-\infty}^{\phi} E d\phi + g E^2 \frac{dE}{d\phi} + h \frac{dQE}{d\phi} = 0 \\ \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{1}{T_V} \frac{dQ}{dt} + \omega_V^2 Q = \vartheta E^2, \end{cases} \quad (1)$$

де параметри a і b описують дисперсію середовища; g і h - електронну та електронно-коливальну нелінійності; Q - амплітуда коливань, активних в комбінаційному розсіюванні, ω_V - їх частота, T_V характеризує затухання коливань, а ϑ - ефективність нелінійного збудження цих коливань світловим полем.

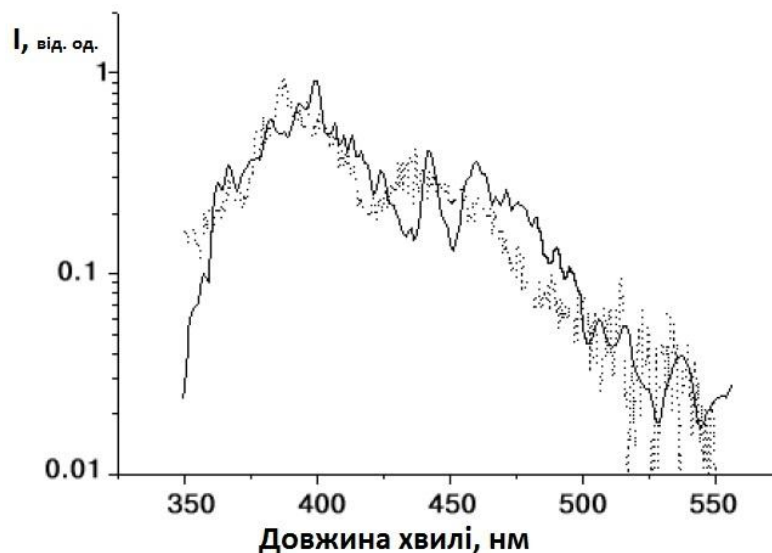


Рисунок 2 – Генерація спектрального суперконтинуума в повному хвилеводі зі стисненим дейтерієм

На рисунку 2 наведені результати експерименту по генерації спектрального суперконтинуума в повному хвилеводі, заповненому стисненим дейтерієм, при накачуванні 150-ти фемтосекундними імпульсами з довжиною хвилі 390 нм [7], а також результати чисельного моделювання на основі системи (1). Як видно з графіків, теоретична крива практично збігається з результатами експерименту, що свідчить про адекватність використовуваного підходу. Смуга частот даного спектрального суперконтинуума за рівнем 1% дорівнює 300 ТГц, що дозволяє передати до 3000 каналів з шириною окремого 100 ГГц. Слід зазначити, що в цьому діапазоні спектра волокна на основі плавненого кварцу мають втрати більше 10 дБ, які в основному пов'язані з Релеєвським розсіюванням в матриці волокна. В даний час запропоновані фотонно-кристалічні волокна з повітряною серцевиною [8, 9], Релеєвські втрати в яких можуть бути зведені до нуля шляхом створення вакууму всередині волокна. Дана смуга частот також перспективна для обміну великими потоками інформації в космічному просторі.

Найбільш цікавими властивостями на даний час володіють генератори суперконтинуума на основі так званих мікроструктурних волокон [9, 10], які також відносять до фотонно-кристалічних. Ці волокна включають періодичну структуру повітряних порожнин у межах кварцової серцевини, причому в

центрі знаходиться кварцове ядро. Схема серцевини такого волокна і мікрофотографія наведено на рисунку 3 [11].

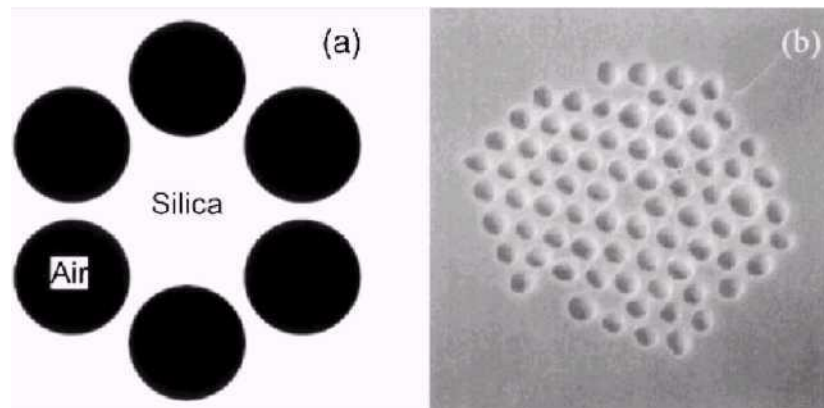


Рисунок 3 – Схема серцевини мікроструктурного волокна (а) і його мікрофотографія (б)

Хвилеводний ефект в таких структурах здійснюється завдяки внутрішньому відображенню від періодичної структури «повітря-кварц» і створення широкої забороненої зони для випромінювання, що поширюється вздовж такої структури. Дані волокна володіють унікальними дисперсійними властивостями, зокрема, змінюючи співвідношення діаметрів центральної області і повітряних порожнин, можливо змінити довжину хвилі нульової дисперсії від 1000 нм до 650 нм (для прикладу, звичайні кварцові волокна не можуть мати нульову дисперсію нижче довжини хвилі 1,28 мкм). Система (1) дозволяє розраховувати параметри гіперконтинуума в мікроструктурних волокнах, оскільки в ній може бути врахована дисперсія будь-якого виду, як матеріального середовища, так і хвилеводної мікроструктури.

У 2009 р. в мікроструктурних волокнах була отримана генерація спектрального гіперконтинуума, що простягається від 400 нм до 1600 нм [10]. На рисунку 4 наведено спектр вихідного випромінювання з волокна довжиною 75 см, при накачуванні випромінюванням фемтосекундного лазера на сапфірі з титаном (довжина хвилі 780 нм) з середньою потужністю 250 мВт і частотою повторення імпульсів 100 МГц.

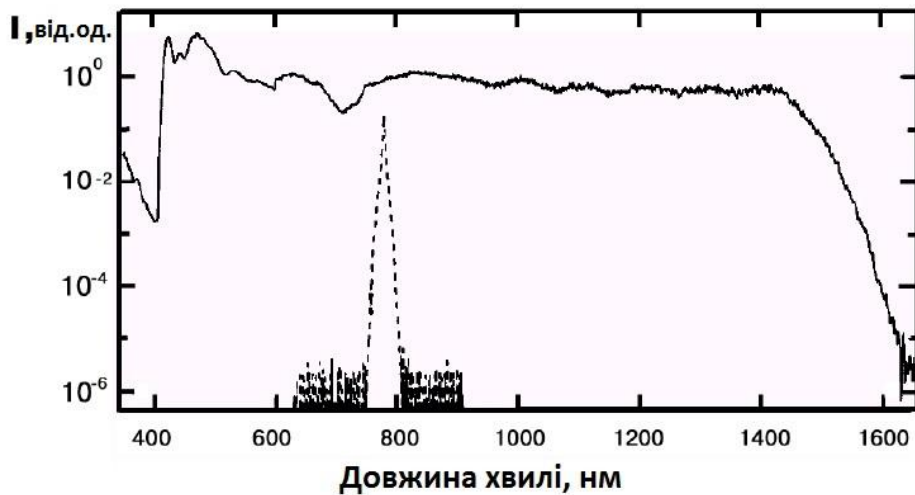


Рисунок 4 – Спектр вихідного випромінювання з мікроструктурного волокна довжиною 75 см, при накачуванні випромінюванням фемтосекундного лазера на сапфірі з титаном (довжина хвилі 780 нм) з середньою потужністю 250 мВт і частотою повторення імпульсів 100 МГц (суцільна крива). Штрихова лінія – спектр випромінювання генератора на вході волокна [11]

Широкопasmовий гіперконтинуум має смугу частот за рівнем 1% рівну 400 ТГц, що дозволяє створити 4000 інформаційних каналів, рознесених на 100 ГГц. Орієнтуючись на звичайну на сьогоднішній день швидкість передачі по одному каналу близько 40 Гб/с, з використанням даного гіперконтинуума можлива передача до 80 Тб/с.

Таким чином, в даній роботі запропоновано спосіб збільшення пропускної здатності волоконних ліній зв'язку та зв'язку у відкритому просторі за рахунок використання надширокопasmового випромінювання спектрального суперконтинуума, зформованого в нелінійних середовищах при поширенні в них фемтосекундних імпульсів. Аналіз літератури і чисельні розрахунки формування спектрального суперконтинуума в різних середовищах, включаючи фотонно-кристалічні волокна, показали можливість створення когерентного джерела генеруючого випромінювання в смузі частот УФ, видимого та ІЧ діапазонів спектру, що досягає 300...400 ТГц (350 нм...550 нм; 500 нм...1500 нм). Проведено оцінки можливої швидкості передачі інформації з використанням даних джерел і показано, що вона може досягати ~ 100 Тб/с.

Література

1. Hecht J. Understanding fiber optics. 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999. -367 p.
2. Hecht J. Long-haul DWDM systems go the distance // Laser Focus. 2000. V. 36. No.10. P.125-132.
3. Whipple T.C. Amplifier transmits 3.2 Tb/s over 1500 km // Photonics Spectra. 2000. V. 34. No.7. p.34.
4. Hecht J. Dense WDM multiplies capacity of submarine cables // Laser Focus. 2000. V. 36. No.11. P.91-100.
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. - М.: Мир, 1996. - 323 с.
6. Wittmann M., Penzkoter A. Spectral superbroadening of femtosecond laser pulses // Opt. Commun. 1985. V.5. P.308-317.
7. Беспалов В.Г., Козлов С.А., Стаселько Д.И. и др. Явление генерации фемтосекундного спектрального суперконтинуума в оптических средах с электронной и электронно-колебательной нелинейностями // Известия РАН, сер. физическая. 2000. В.10. С.23-34.
8. Козлов С.А., Сазонов С.В. Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах // ЖЭТФ. 1997. Т.111. В.2. С.404-418.
9. Kozlov S.A., Oukrainski A.O., Shpolyanskiy Yu.A., Bepalov V.G., Sazonov S.V. Spectral evolution of propagating extremely short pulses // Physics of vibrations. 1999. V.7. N 1. P.19-27.
10. Беспалов В.Г., Козлов С.А., Шполянский Ю.А. Метод анализа динамики распространения фемтосекундных импульсов с континуумным спектром в прозрачных оптических средах // Оптический журнал. 2000. N 4. С.5-11.
11. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.S.J., de Sandro J.P. Properties of photonic crystal fiber and the effective index model // J. Opt. Soc. Am. A, 1998, V. 15, P. 748-752.