

УДК 535.3

**РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ КОГЕРЕНТНОСТИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО  
СПЕКТРАЛЬНОГО СУПЕРКОНТИНУУМА В КВАРЦЕВОМ  
ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ****М.В. Мельник, А.Н. Цыпкин**

Показано, что при генерации фемтосекундного спектрального суперконтинуума в кварцевом волокне в областях нормальной, нулевой и аномальной дисперсий групповых скоростей с увеличением центральной длины волны фемтосекундного лазерного импульса на входе время когерентности излучения со сверхшироким спектром значительно уменьшается, однако в области нулевой групповой дисперсии кварцевого волокна существует «скачок» времени когерентности. Например, для длительности исходного импульса 40 фс и пиковой интенсивности  $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> при генерации спектрального суперконтинуума в кварцевом волокне на длине волны исходного излучения 800 нм время когерентности равно 22 фс, при увеличении длины волны время когерентности уменьшается до 4 фс (1180 нм). В области нулевой групповой дисперсии (1260 нм) время когерентности резко увеличивается до 20 фс, после чего опять уменьшается, достигая минимума в 4 фс (1560 нм).

**Ключевые слова:** фемтосекундный спектральный суперконтинуум, время когерентности излучения.

**Введение**

Генерация суперконтинуума в оптических волокнах – хорошо изученный процесс и может включать различные нелинейные эффекты, такие как самомодуляция и кросс-модуляция, солитонные эффекты, комбинационное рассеяние, модуляционная неустойчивость и четырехволновые смешения. Большинство спектральных суперконтинуумов генерируются в области аномальной дисперсии групповой скорости, в данном случае в процессе уширения спектра доминируют солитонные эффекты [1–4]. Эти эффекты приводят к тому, что спектр становится чувствительным к импульсу, что, в свою очередь, приводит к низкой согласованности между соседствующими импульсами, а следовательно, и к низкой когерентности.

Избавиться от этого можно двумя способами – либо тщательно выбирать входные параметры [4], либо генерировать спектральный суперконтинуум в области с нормальной дисперсией групповых скоростей, где солитоны формироваться не могут, а генерация фемтосекундного спектрального суперконтинуума происходит в основном из-за фазовой самомодуляции (ФСМ) [5–7]. ФСМ является внутренним детерминированным процессом, который сохраняет согласованность входных импульсов. По этой причине спектральный суперконтинуум, сгенерированный в этом режиме, обладает высокой спектральной согласованностью и стабильностью. Однако в этом случае требуется большая интенсивность лазерных импульсов.

В настоящее время вопрос когерентности считается почти полностью проработанным. Однако работ по исследованию времени когерентности обнаружено не было, а знание о времени когерентности спектрального суперконтинуума может быть использовано, например, для расчета максимального разрешения оптической когерентной томографии [8–11].

В настоящей работе выявлены оптимальные условия генерации высококогерентного фемтосекундного спектрального суперконтинуума в оптическом кварцевом волокне на основе определения времени когерентности исследуемого излучения и зависимости времени когерентности от длины волны. Например, при увеличении длительности входного импульса время когерентности увеличивается. В области нормальной групповой дисперсии существует максимум времени когерентности на длине волны 800 нм, после чего величина времени когерентности значительно уменьшается при смещении к области аномальной групповой дисперсии. Однако в области нулевой групповой дисперсии (~1260 нм для оптического кварцевого волокна) существует скачок увеличения времени когерентности, после чего величина времени когерентности продолжает убывать и достигает своего минимума в области аномальной групповой дисперсии оптической среды. Например, для длительности исходного импульса 40 фс на длине волны 800 нм время когерентности равно 22 фс, при увеличении длины волны время когерентности падает до 4 фс на длине волны 1180 нм. В области нулевой групповой дисперсии время когерентности резко увеличивается до 20 фс, после чего опять уменьшается, достигая минимума в 4 фс на длине волны 1560 нм.

**Математическая модель самовоздействия фемтосекундных световых импульсов  
в диэлектрической среде**

Распространение интенсивного светового импульса в волноведущей диэлектрической среде с нормальной групповой дисперсией и нерезонансной нелинейностью может быть описано следующим уравнением [12, 13]:

$$\frac{\partial E}{\partial z} - a \frac{\partial^3 E}{\partial \tau^3} + b \int_{-\infty}^{\tau} E d\tau' + gE^2 \frac{\partial E}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

где  $E$  – электрическое поле светового импульса;  $z$  – пространственная координата, вдоль которой распространяется импульс;  $\tau = t - \frac{N_0}{c}z$  – время в движущейся с импульсом системе координат,  $t$  – время,  $c$  – скорость света в вакууме; параметры  $N_0$ ,  $a$  и  $b$  описывают линейный показатель преломления среды и его дисперсию:

$$n(\omega) = N_0 + a c \omega^2 - c \frac{b}{\omega^2}, \quad (2)$$

параметр  $g$  характеризует безынерционную кубическую по полю нелинейность поляризационного отклика среды. Уравнение (1) описывает самовоздействие светового импульса, в том числе при его высокой интенсивности, и генерацию спектрального суперконтинуума [12]. Теоретический анализ этого уравнения будем проводить для случаев, когда спектр интенсивных импульсов находится в области нормальной, нулевой и аномальной групповой дисперсии среды. Метод решения данного уравнения приведен в работе [13]. Например, для распространенного в лазерной технике кварцевого стекла зависимость (2) при  $N_0 = 1,45$ ,  $a = 4,04 \cdot 10^{-42} \text{ с}^3/\text{м}$ ,  $b = 0$  и коэффициенте нелинейного показателя преломления  $n_2 = 2,9 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$  описывает дисперсию линейного показателя преломления стекла с точностью до третьего знака после запятой в диапазоне от 550 до 1100 нм [6]. Центральная длина волны  $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0 = 1260 \text{ нм}$  спектра входного импульса соответствует длине волны нулевой групповой дисперсии кварцевого волокна. Импульс на входе в

среду будем полагать гауссовым вида  $E = E_0 \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_p}\right)^2} \cdot \sin(\omega_0 t)$ , где  $E_0$  – максимальная амплитуда электрического поля излучения;  $\tau_p$  – его длительность;  $\omega_0$  – центральная частота спектра.

#### Зависимость времени когерентности от длины волны для импульсов разных длительностей

Для определения времени когерентности рассмотрим взаимодействие светового фемтосекундного импульса с самим собой, сдвинутым на временную задержку. Зная временную структуру поля на выходе из оптической среды при генерации спектрального суперконтинуума, можно определить интерференционный сигнал по следующей формуле:

$$I(\Delta\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} (E(t) + E(t + \Delta\tau))^2 dt, \quad (3)$$

где  $I(\Delta\tau)$  – зависимость интенсивности интерференционного поля от временной задержки;  $E(t)$ ,  $E(t + \Delta\tau)$  – временная структура поля на выходе из оптической среды и то же поле, сдвинутое во времени;  $\Delta\tau$  – временной сдвиг между интерферирующими импульсами.

На рис. 1–3 представлены результаты расчета интерференционного сигнала для временной структуры на выходе из кварцевого оптического волокна длиной 10 мм при генерации спектрального суперконтинуума для исходного импульса с длительностью  $\tau_p = 40 \text{ фс}$ , пиковой интенсивностью  $I = 10^{13} \text{ Вт}/\text{см}^2$  и центральной длиной волны излучения  $\lambda_0 = 800 \text{ нм}$  (рис. 1, область нормальной групповой дисперсии кварцевого оптического волокна),  $\lambda_0 = 1260 \text{ нм}$  (рис. 2, область нулевой групповой дисперсии кварцевого оптического волокна),  $\lambda_0 = 1560 \text{ нм}$  (рис. 3, область аномальной групповой дисперсии кварцевого оптического волокна), определенные по формуле (3).

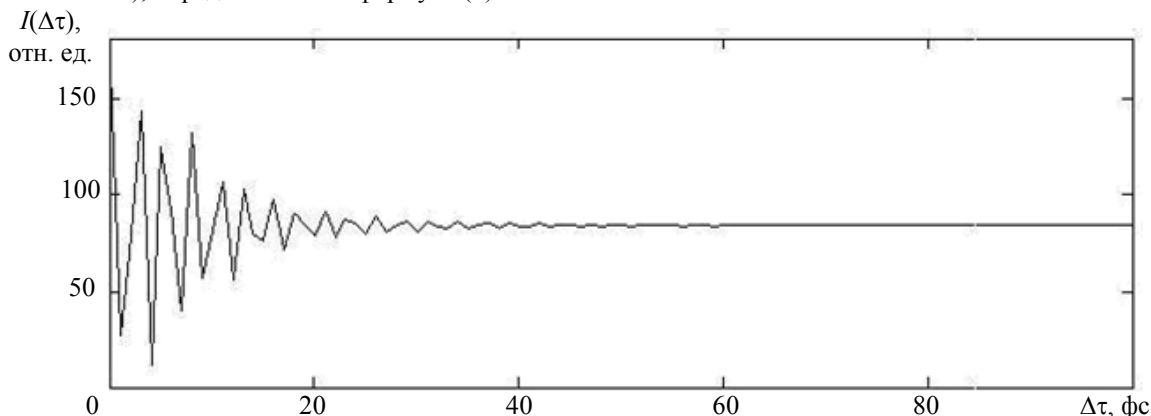


Рис. 1. Интерференционный сигнал для временной структуры на выходе из кварцевого оптического волокна длиной 10 мм при генерации спектрального суперконтинуума для исходного импульса длительностью  $\tau_p = 40 \text{ фс}$ , пиковой интенсивностью  $I = 10^{13} \text{ Вт}/\text{см}^2$  и центральной длиной волны излучения  $\lambda_0 = 800 \text{ нм}$

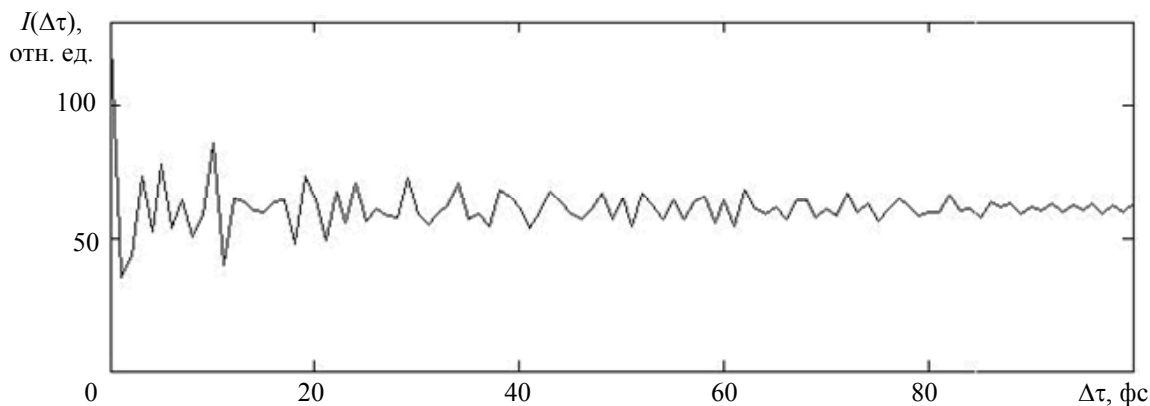


Рис. 2. Интерференционный сигнал для временной структуры на выходе из кварцевого оптического волокна длиной 10 мм при генерации спектрального суперконтинуума для исходного импульса длительностью  $\tau_p = 40$  фс, пиковой интенсивностью  $I = 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> и центральной длиной волны излучения  $\lambda_0 = 1260$  нм

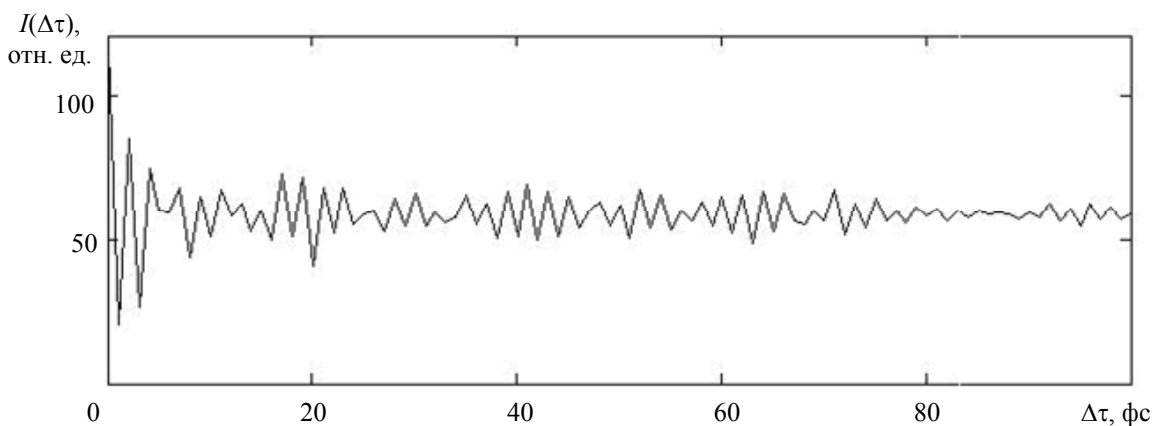


Рис. 3. Интерференционный сигнал для временной структуры на выходе из кварцевого оптического волокна длиной 10 мм при генерации спектрального суперконтинуума для исходного импульса длительностью  $\tau_p = 40$  фс, пиковой интенсивностью  $I = 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> и центральной длиной волны излучения  $\lambda_0 = 1560$  нм

Из рис. 1–3 видно, что при смещении центральной длины волны в область аномальной групповой дисперсии оптической среды время когерентности импульса со сверхшироким спектром значительно уменьшается.

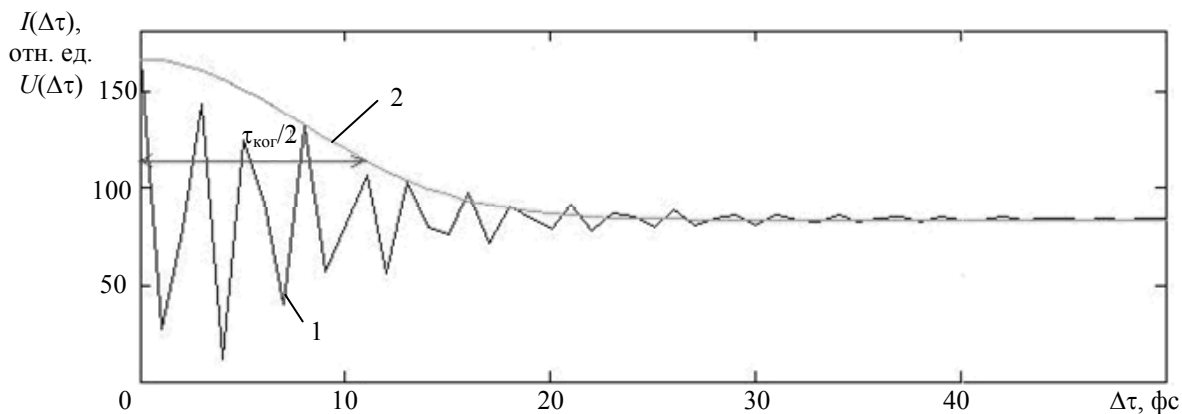


Рис. 4. Расчет времени когерентности импульса со сверхшироким спектром; кривая 1 – интерференционный сигнал; кривая 2 – экспоненциальная огибающая

На рис. 4 приведен пример графического определения времени когерентности фемтосекундного спектрального суперконтинуума. В качестве огибающей  $U(\Delta\tau)$  используется экспоненциальная функция (кривая 2), накладываемая на функцию интерференционного сигнала (кривая 1) для временной структу-

ры на выходе из кварцевого оптического волокна, которую можно описать следующей формулой:

$$U(\Delta\tau) = e^{-\left(\frac{\Delta\tau}{\tau_{\text{ког}}}\right)^2}, \text{ где } \tau_{\text{ког}} - \text{ время когерентности фемтосекундного спектрального суперконтинуума.}$$

Определяя время когерентности таким методом для различных длин волн, получим зависимость времени когерентности от центральной длины фемтосекундного лазерного импульса на входе, представленную на рис. 5.

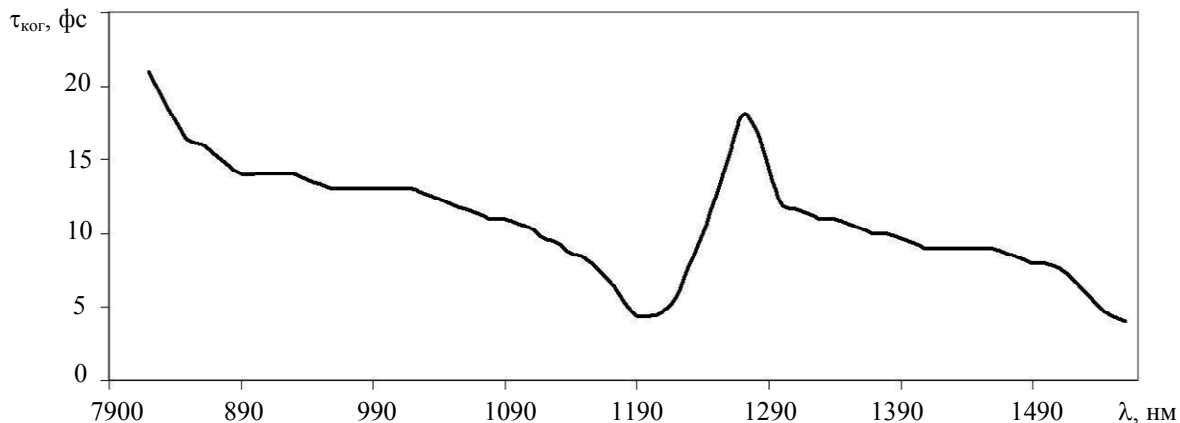


Рис. 5. Зависимость времени когерентности от центральной длины фемтосекундного лазерного импульса на входе при длительности исходного импульса  $\tau_p = 40$  фс и пиковой интенсивности  $I = 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>

#### Заключение

Методами численного моделирования рассчитаны времена когерентности излучения спектральных суперконтинуумов, генерируемых в различных областях групповой дисперсии кварцевого оптического волокна. Проанализирована зависимость времени когерентности от центральной длины волны фемтосекундного лазера. Показано, что при увеличении центральной длины волны время когерентности значительно уменьшается, однако, в области нулевой групповой дисперсии кварцевого стекла существует скачок увеличения времени когерентности. Например, для длительности исходного импульса 40 фс на длине волны 800 нм время когерентности равно 22 фс, при увеличении длины волны время когерентности падает до 4 фс на длине волны 1180 нм. В области нулевой групповой дисперсии время когерентности резко увеличивается до 20 фс, после чего опять уменьшается, достигая минимума в 4 фс на длине волны 1560 нм. Следовательно, использование излучения спектрального суперконтинуума, генерируемого в области нормальной групповой дисперсии, является целесообразным для использования его, например, в оптической когерентной томографии, системах передачи информации, из-за высокого значения времени когерентности и квазилинейной частотной модуляции временной структуры.

Работа поддержана грантами ГК № 16.740.11.0459, ГК № соглашения 14.132.21.1392 и РФФИ № 12-02-31633.

#### Литература

1. Dudley J.M., Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber // *Rev. Mod. Phys.* – 2006. – V. 78. – № 4. – P. 1135–1184.
2. Islam M.N., Sucha G., Bar-Joseph I., Wegener M., Gordon J.P., Chemla D.S. Femtosecond distributed soliton spectrum in fibers // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1989. – V. 6. – № 6. – P. 1149–1158.
3. Herrmann J., Griebner U., Zhavoronkov N., Husakou A., Nickel D., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P. St. J., Korn G. Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – V. 88. – № 17. – P. 173901 (4 pages).
4. Corwin K.L., Newbury N.R., Dudley J.M., Coen S., Diddams S.A., Washburn B.R., Weber K., Windeler R.S. Fundamental amplitude noise limitations to supercontinuum spectra generated in a microstructured fiber // *Appl. Phys. B.* – 2003. – V. 77. – № 2–3. – P. 269–277.
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – 324 с.
6. Беспалов В.Г., Козлов С.А., Сутягин А.Н., Шполянский Ю.А. Сверхширение спектра интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов и их временное сжатие до одного колебания светового поля // *Оптический журнал.* – 1998. – Т. 65. – № 10. – С. 85–88.
7. Heidt A.M. Pulse preserving flat-top supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fibers // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2010. – V. 27. – № 3. – P. 550–559.
8. Povazay B., Bizheva K., Unterhuber A., Hermann B., Sattmann H., Fercher A.F., Drexler W., Apolonski A., Wadsworth W.J., Knight J.C., Russell P.S., Vetterlein M., Scherzer E. Submicrometer axial resolution optical coherence tomography // *Opt. Lett.* – 2002. – V. 27. – № 20. – P. 1800–1802.

9. Humbert G., Wadsworth W., Leon-Saval S., Knight J., Birks T., Russell P.St.J., Lederer M., Kopf D., Wiesauer K., Breuer E., Stifter D. Supercontinuum generation system for optical coherence tomography based on tapered photonic crystal fiber // Optics Express. – 2006. – V. 14. – № 4. – P. 1596–1603.
10. Hartl I., Li X.D., Chudoba C., Ghanta R.K., Ko T.H., Fujimoto J.G., Ranka J.K., Windeler R.S. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber // Optics Letters. – 2001. – V. 26. – № 9. – P. 608–610.
11. Гуров И.П., Киракозов А.Х. Анализ методов обработки интерферометрических данных в спектральной оптической когерентной томографии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 21–24.
12. Козлов С.А., Сазонов С.В. Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1997. – Т. 111. – В. 2. – С. 404–418.
13. Шполянский Ю.А. Сценарии развития фемтосекундного спектрального суперконтинуума // Проблемы когерентной и нелинейной оптики / Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. – СПб, 2000. – С. 136–153.

**Мельник Максим Владимирович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, maxim.melnick@gmail.com

**Цыпкин Антон Николаевич**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, tsypkinan@mail.ru