

УДК 535.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ УЛЬТРАКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА ПО ЦЕПОЧКЕ КВАРЦЕВЫХ МИКРОСФЕР

© 2014 Е. С. Козлова

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Работа посвящена моделированию распространения ультракороткого импульса в волноводах двух типов. Первый тип (I тип) представляет собой обычный волновод из кварцевого стекла цилиндрической формы (без оболочки). Второй тип (II тип) представляет собой упорядоченные друг за другом микросферы, изготовленные также из кварцевого стекла. Для учёта зависимости диэлектрической проницаемости от частоты излучения применялась трёхпараметрическая модель Селлмейера. Были рассчитаны коэффициенты временного уширения и усиления импульса, а также коэффициент сужения спектра импульса. Численное моделирование FDTD-методом, учитывающим частотную зависимость диэлектрической проницаемости и реализованным в программном пакете FullWAVE, показало, что при распространении ультракороткого линейно-поляризованного Гауссова импульса длительностью 3,55 фс и центральной длиной волны 532 нм в волноводе, состоящем из упорядоченных друг за другом кварцевых микросфер радиусом 1 мкм, не наблюдается временного уширения импульса по полуспаду интенсивности на расстоянии 8 мкм, в то время как в случае распространения такого импульса в обычном цилиндрическом волноводе из кварца наблюдается временное уширение импульса в два раза.

Ультракороткий импульс, диэлектрическая проницаемость, модель Селлмейера, передача информации.

Введение

Развитие Интернета и сетевых коммуникаций приводит к повышенному спросу на широкополосные системы связи. Такие системы связи основаны на оптических волокнах, которые способны передавать оптические сигналы на большие расстояния. Современные оптические волокна способны передавать последовательности импульсов, длительностью порядка 2-8 пс на расстояния от 100 до 1000 км со скоростью от 10 до 12 Гб/с [1]. Однако объёмы передаваемой информации растут, и это требует разработки новых методик уплотнения канала связи. Ультракороткие импульсы – это многообещающая технология для достижения повышения объёмов передаваемой по оптическим волокнам информации. Однако чем короче импульс, тем сильнее он видоизменяется в процессе передачи по каналу связи. Основными факторами видоизменения импульса являются наложение импульсов друг на друга, наложение шума, влияние дисперсии и различных нелинейных эффектов [2].

В настоящее время разработаны и продемонстрированы методы генерации импульсов с длительностью менее 5 фс [3-5]. Уникальные характеристики таких импульсов обуславливают их широкое применение в фундаментальной науке, технике и медицине [6], в том числе и в технологиях передачи данных [7]. Большое количество работ посвящено экспериментальному исследованию распространения таких импульсов в различных оптических волокнах [8] и моделированию распространения фемтосекундных импульсов в различных волноводах [9, 10]. Однако из-за явления уширения спектра традиционные подходы, описывающие распространение импульсов как в линейных, так и в нелинейных средах, неприменимы. При моделировании процесса распространения фемтосекундных импульсов необходимо использовать методы, учитывающие не только пространственную, но и частотную дисперсию материала [11].

Рассматривается моделирование распространения ультракороткого импульса в волноводах двух типов. Первый тип (I тип)

представляет собой обычный волновод из кварцевого стекла цилиндрической формы (без оболочки). Второй тип (II тип) представляет собой упорядоченные друг за другом микросферы, изготовленные также из кварцевого стекла. Для учёта зависимости диэлектрической проницаемости от частоты излучения применялась модель Селлмейера. Были рассчитаны коэффициенты временного уширения и усиления импульса и коэффициент сужения спектра импульса. Расчёты проводились FDTD-

методом, реализованным в программе FullWAVE (RSoft).

Численное моделирование

Рассмотрим несколько волноводов, одни из которых представляют из себя цилиндры из кварцевого стекла следующих длин: 2 и 8 мкм (I тип), а другие – упорядоченные друг за другом кварцевые микросферы радиусом в 1 мкм (II тип). На рис.1 схематично представлены волноводы типа I (рис.1, а) и II (рис.1, б).

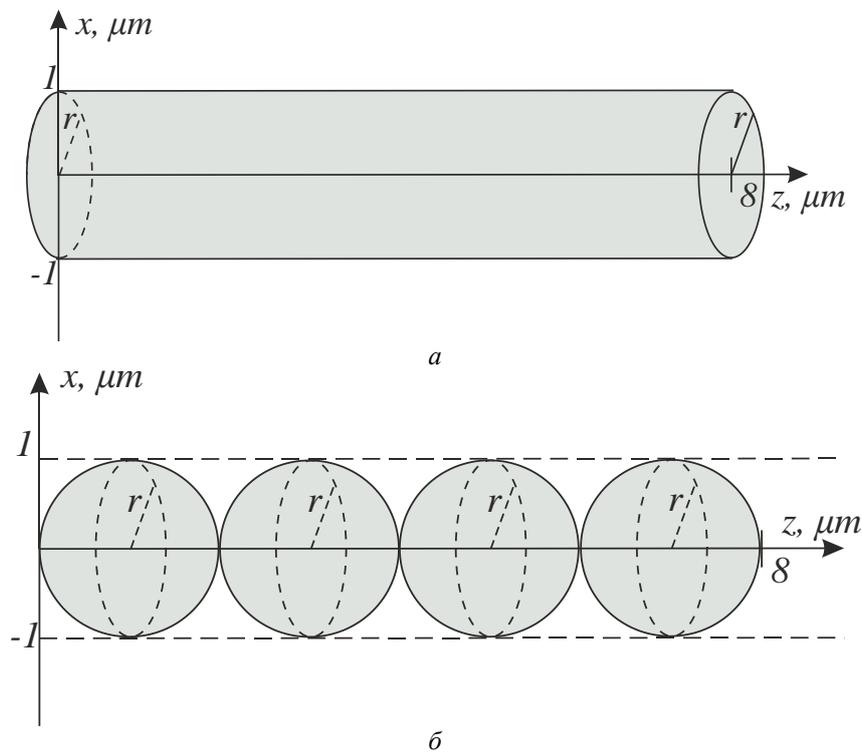


Рис. 1. Волноводы длиной 8 мкм: а – тип I, б – тип II

Для учёта зависимости диэлектрической проницаемости от частоты излучения воспользуемся моделью Селлмейера [12]:

$$\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_{\infty} + \sum_m \frac{A_m \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_m^2 + i\lambda \delta_{Sm}}, \quad (1)$$

где ε_{∞} – диэлектрическая проницаемость на высоких частотах; λ – длина волны, мкм; λ_m – резонансная длина волны, мкм; A_m – величина резонанса; δ_{Sm} – коэффициент демпфирования, мкм. Параметры модели для кварцевого стекла представлены в табл. 1 [12].

Таблица 1. Параметры модели Селлмейера для кварцевого стекла

m	A_m	λ_m	δ_{Sm}
1	0,69616630	0,068404300	0
2	0,40794260	0,11624140	0
3	0,89747940	9,8961610	0
$\varepsilon_{\infty} = 1$			

На вход волновода подаётся короткий модулированный Гауссов импульс с плоским фронтом и равномерной интенсивностью вида:

$$\psi(x, y, \tau) = \text{rect}\left(\frac{x}{\alpha}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\beta}\right) \times \exp\left\{-\left(\frac{\tau - 0,5ct_s}{t_d}\right)^2\right\} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\tau\right), \quad (2)$$

где $\alpha = \beta = 1,6$ мкм – размер стороны квадрата, ограничивающего плоскую волну в начальной плоскости; $\tau = ct$, мкм; c – скорость света, мкм/с; t – время, с; t_s – длительность импульса, с; t_d – ширина импульса, мкм. Длина волны импульса равна 0,532 мкм. Плоскость поляризации импульса совпадает с плоскостью XZ (отличен от нуля только компонент E_x).

С помощью FDTD-метода моделируется прохождение через различные волноводы фемтосекундного импульса (2) длительностью 3,55 фс. Моделирование производилось при следующих расстояниях между узлами сетки отсчетов: $h_x = 0,02$ мкм, $h_y = 0,02$ мкм, $h_z = 0,015$ мкм, $h_t = 0,008$ мкм. На рис. 2 показано временное распределение интенсивности входящего импульса и соответствующий ему спектр.

На рис. 3 показано временное распределение интенсивности выходящих импульсов из волноводов I и II типов длиной 8 мкм, а на рис. 4 представлены соответствующие им спектры.

Рассчитаем коэффициент усиления импульса по формуле:

$$k_f = \frac{I_f}{I_{in}}, \quad (3)$$

где k_f – коэффициент фокусировки; I_f – величина максимальной интенсивности выходного излучения, а.е.; I_{in} – величина максимальной интенсивности падающего излучения, а.е. (а.е. – произвольные единицы).

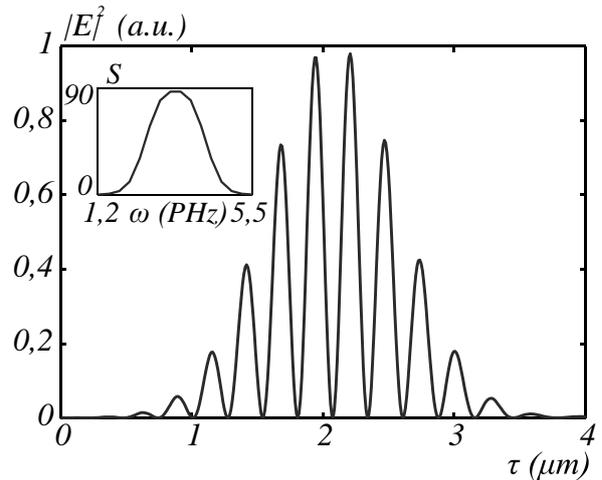


Рис. 2. Временное распределение интенсивности в точке (0, 0, 0) и спектр входящего импульса

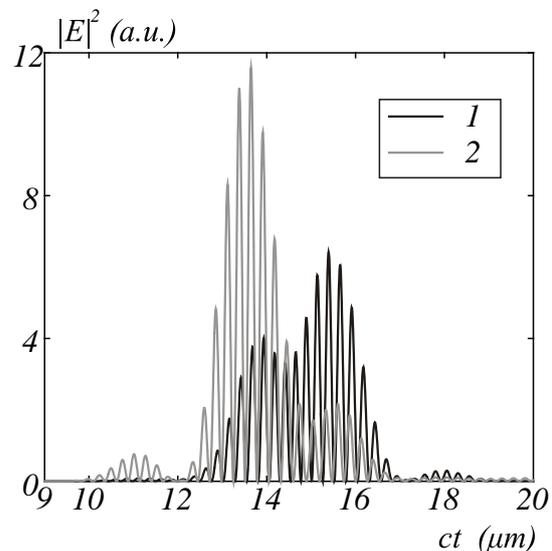


Рис. 3. Временное распределение интенсивности на выходе из волновода I типа – линия 1 и II типа – линия 2

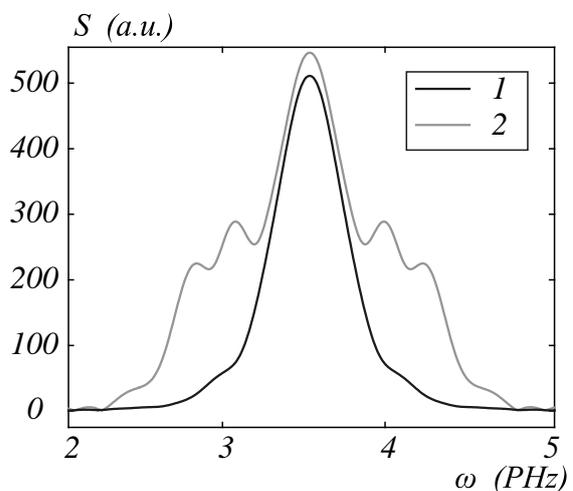


Рис. 4. Спектр импульса на выходе из волновода I типа – линия 1 и II типа – линия 2

Рассчитаем коэффициент временно-го уширения импульса по формуле:

$$k_t = \frac{t_{out}}{t_{in}}, \quad (4)$$

где k_t – коэффициент временного уширения; t_{in} – длительность входящего импульса по полуспаду интенсивности, фс; t_{out} – длительность выходящего импульса по полуспаду интенсивности, фс.

Рассчитаем коэффициент сужения спектра по формуле:

$$k_\omega = \frac{\Delta\omega_{in}}{\Delta\omega_{out}}, \quad (5)$$

где k_ω – коэффициент сужения спектра; $\Delta\omega_{in}$ – ширина спектра входящего излучения, ПГц; $\Delta\omega_{out}$ – ширина спектра выходящего излучения, ПГц.

Результаты расчётов представлены в табл. 2 – 4.

Таблица 2. Коэффициенты усиления импульса

Длина, мкм \ Тип	I	II
2	21,62	42,02
8	5,31	10,77

Таблица 3. Коэффициенты временного уширения импульса

Длина, мкм \ Тип	I	II
2	1,03	1,02
8	2,41	1,07

Таблица 4. Коэффициенты сужения спектра импульса

Длина, мкм \ Тип	I	II
2	0,99	0,99
8	1,96	1,21

Из табл. 2 видно, что интенсивность на выходе из волноводов II типа в два раза больше интенсивности на выходе из волноводов I типа. Отметим, что импульс, распространяющийся в волноводе II типа, практически не испытывает временного уширения по полуспаду интенсивности (табл. 3), и при этом его спектр терпит незначительное сужение (табл. 4).

Полученные результаты объясняются фокусирующими свойствами микросфер, которые с помощью фокусировки позволяют уменьшить уширение распространяющегося импульса и повысить интенсивность на выходе из волновода. В случае же обыкновенного цилиндра на выходе формируется интерференционная картина нескольких мод, распространяющихся в этом волноводе.

Заключение

Показано, что фемтосекундный импульс не уширяется по времени по полуспаду интенсивности при прохождении через четыре упорядоченные друг за другом и выполненные из кварцевого стекла микросферы. При распространении через цилиндрический волновод фемтосекундный импульс уширяется более чем в два раза. Волновод, состоящий из набора нескольких микросфер, можно рассматривать как аналог градиентных волноводов, в которых электромагнитные импульсы могут распространяться на существенные расстояния вследствие периодической фокусировки излучения, которую обуславливает параболическая зависимость коэффициента преломления волновода. Полученные результаты могут быть применены в области передачи информации по оптическим волокнам.

Библиографический список (References)

1. Weise F., Pawlowska M., Achazi G. and Lindinger A. Full control of polarization and temporal shape of ultrashort laser pulses transmitted through an optical fiber // *J. Opt.* 2011. V. 13. P. 1-8.
2. Lin Q., Agrawal G.P. Pulse broadening induced by dispersion fluctuations in optical fibers // *Optics Communications.* 2002. V. 206. P. 313-317.
3. Hecht J. Spectral Broadening Advances Quest for Single-Cycle Pulses // *Laser Focus World.* 2011. V. 47, no. 8. P. 65-70.
4. Krauss G., Lohss S., Hanke T, Sell A., Eggert S., Huber R., and Leitenstorfer A. Synthesis of a single cycle of light with compact erbium-doped fiber technology // *Nature Photonics.* 2010. V. 4. P. 33-35.
5. Fourmaux S., Payeur S., Lassonde Ph., Kieffer J.C. and Martin F. Laser Pulse Contrast Ratio Cleaning in 100 TW Scale Ti: Sapphire Laser Systems // *Laser Systems for Applications.* 2011. P. 139-154.
6. Cheng, Ya., Sugioka K., Midorikawa K. Microfabrication of 3D hollow structures embedded in glass by femtosecond laser for Lab-on-a-chip applications // *Applied Surface Science.* 2005. V. 248. P. 172-176.
7. Block M., Jahns J., Grunwald R. Few-cycle high-contrast vortex pulses // *Optics Letters.* 2012. V. 37, no.18. P. 3804-3806.
8. El_Mashade M.B., Nady M. Analysis of Ultra-Short Pulse Propagation in Non-linear Optical Fiber // *Progress In Electromagnetics Research B.* 2009. V. 12. P. 219-241.
9. Liu B., Lu X., Liu Q., Sun S., Li L., Liu X., Ding B., Hu B. Ultraviolet conical emission produced by high-power femtosecond laser pulse in transparent media // *Applied Physics B.* 2012. V. 108. P. 493-500.
10. Piglosiewicz B., Sadiq D., Mascheck M., Schmidt S., Silies M., Vasa P., Lienau C. Ultrasmall bullets of light - focusing few-cycle light pulses to the diffraction limit // *Optics Express.* 2011. V. 19, no. 15. P. 14451-14463.
11. Lee J., Kim H., Kang N., Jung H. Effective medium approach of left-handed material using a dispersive FDTD method // *IEEE Transaction of Magnetics.* 2005. V. 41, no. 5. P. 1484-1487.
12. Couairon A., Sudrie L., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses // *Physical Review B.* 2005. V. 71. P. 125435-125441.

Информация об авторе

Козлова Елена Сергеевна, аспирант кафедры технической кибернетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва

(национальный исследовательский университет). E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы.

**SIMULATION OF ULTRASHORT PULSE TRANSMISSION
IN A CHAIN OF FUSED SILICA MICROSPHERES**

© 2014 E. S. Kozlova

Samara State Aerospace University, Russian Federation

The paper is devoted to the simulation of ultrashort pulse propagation in waveguides of two types. The first type (type 1) represents an ordinary waveguide made of cylindrically shaped fused silica without coating. The second type (type 2) consists of microspheres made of the same fused silica following one another. A three-parameter Sellmeyer model is used to take into account the dependence of electrical permittivity on the frequen-

cy of radiation. The coefficients of pulse broadening and amplification as well as the coefficient of the pulse spectrum narrowing have been calculated. The numerical simulation using the FDTD method which takes into account the frequency dependence of the permittivity and implemented in the FullWAVE software package showed that there is no temporal broadening in the case of propagation of linearly polarized ultrashort pulse 3.55 fs long with a central wavelength of 532 nm in a waveguide consisting of a sequence of fused silica microspheres with the radius of 1 μm , while there is a two-fold temporal broadening of the pulse in the case of transmission of this pulse in a conventional silica cylindrical waveguide.

Ultrashort pulse, permittivity, Sellmeyer model, information transmission.

About the author

Kozlova Elena Sergeevna, postgraduate student of the Department of Mathematics and Computer Science, Samara State Aerospace University, Russian Federation. E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com. Area of Research: diffractive optics and numerical methods.