

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

Козлова Е.С.

Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева
(национальный исследовательский университет)

Аннотация

С помощью моделирования FDTD-методом с учётом модели дисперсии Селлмейера показано, что фемтосекундный гауссов лазерный импульс с линейной поляризацией и плоским фронтом фокусируется вблизи поверхности кварцевого цилиндра с диаметром и высотой немного больше центральной длины волны в фокусное пятно почти без боковых лепестков с диаметром, зависящим от длительности импульса: для импульса 1фс диаметр фокуса по полуспаду интенсивности равен 0,2632 от длины волны.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, модель Селлмейера, ультракороткий импульс, фокусировка, кварцевая цилиндрическая ступень.

Введение

Достижения в области квантовой электроники сделали возможной генерацию предельно коротких импульсов электромагнитного излучения. Длительность таких импульсов оказывается порядка фемтосекунд [1, 2]. В связи с этим возник естественный интерес к вопросу о взаимодействии таких импульсов с веществом. В частности, актуальным является анализ распространения предельно коротких импульсов в нелинейных диспергирующих средах в рамках различных моделей среды [3]. Естественной основой всех моделей являются уравнения Максвелла, дополненные материальными уравнениями, определяющими поляризацию или токи [4].

В данной работе рассматривается процесс прохождения ультракороткого линейно поляризованного гауссова импульса через кварцевую цилиндрическую ступеньку. Моделирование проводилось с помощью пакета Fullwave, реализующего FDTD метод решения системы уравнений Максвелла. Производится расчёт коэффициента фокусировки и диаметра пятна по полуспаду интенсивности для разной длины импульса.

1. Моделирование

В настоящее время большинство новых экспериментальных результатов в области лазерной физики получают на основе использования сфокусированных в пространстве ультракоротких импульсов, при этом длина импульса соизмерима с длиной волны [5, 6]. Однако, описание таких коротких импульсов уже не может быть корректно построено на основе задания световой волны с помощью несущей и огибающей или с использованием метода медленно меняющихся амплитуд. Ультракороткий импульс содержит спектр частот в сотни нанометров, вследствие чего необходимо учитывать зависимость диэлектрической проницаемости от частоты [7].

Проведём моделирование фокусировки ультракороткого гауссова импульса с линейной поляризацией ($E_x \neq 0, E_y = E_z = 0$) цилиндрической ступенью из кварцевого стекла. Радиус ступеньки составляет

0,3 мкм, высота 0,57825 мкм. Для учёта зависимости диэлектрической проницаемости от частоты излучения воспользуемся моделью Селлмейера:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \sum_m \frac{A_m \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_m^2 + i\lambda \delta_{sm}}, \quad (1)$$

где ϵ_∞ – диэлектрическая проницаемость на высоких частотах, Ф/м; λ – длина волны излучения, мкм; λ_m – резонансная длина волны, мкм; A_m – величина резонанса; δ_{sm} – коэффициент демпфирования. Параметры модели представлены в табл. 1:

Таблица 1. Параметры модели Селлмейера для кварцевого стекла [1]

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
$\epsilon_\infty = 1$			

На вход подадим модулированный гауссов импульс вида:

$$\psi(x, y, z = 0, \tau) = \exp\left\{-\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2\right\} \exp\left\{-\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right\} \times \exp\left\{-\left(\frac{\tau - 0,5 \cdot c \cdot t_s}{t_d}\right)^2\right\} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \tau\right), \quad (2)$$

где σ_x и σ_y – параметры ширины пучка вдоль переменных x и y соответственно; $\tau = ct$, мкм; c – скорость света, мкм/с; t – время, с; t_s – продолжительность импульса, с; t_d – ширина импульса, мкм. Длина волны импульса равна 0,532 мкм, $\sigma_x = \sigma_y = 2$.

Последовательно промоделируем процесс прохождения света через кварцевую ступеньку для разных длин импульса: 1, 4 и 10 фс (рис 1-3.). Моделирование производилось с помощью пакета FullWave при следующих значениях параметров: $h_x = 0,02$ мкм, $h_y = 0,03$ мкм, $h_z = 0,015$ мкм, $h_r = 0,015$ мкм, $T = 6$ мкм.

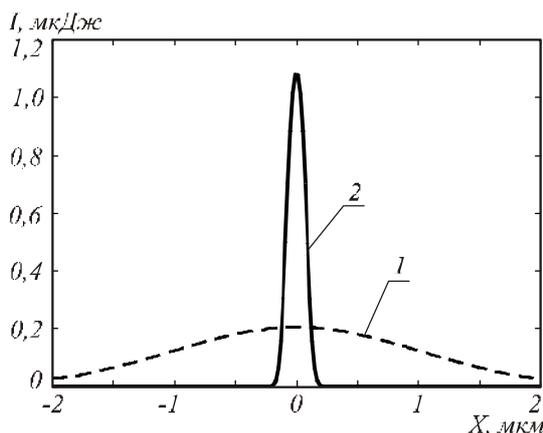


Рис. 1. Фокусировка импульса длиной 1 фс:
кривая 1 – падающая интенсивность,
кривая 2 – интенсивность сфокусированного излучения

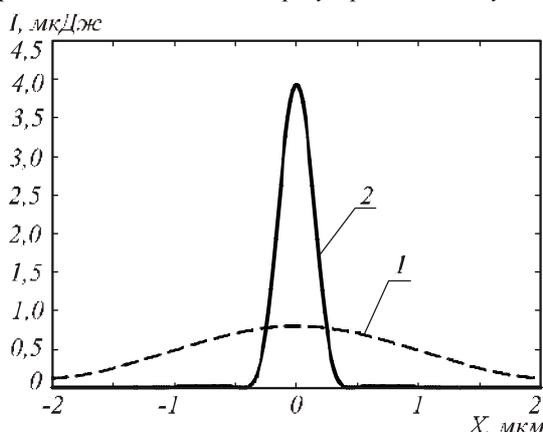


Рис. 2. Фокусировка импульса длиной 4 фс:
кривая 1 – падающая интенсивность,
кривая 2 – интенсивность сфокусированного излучения

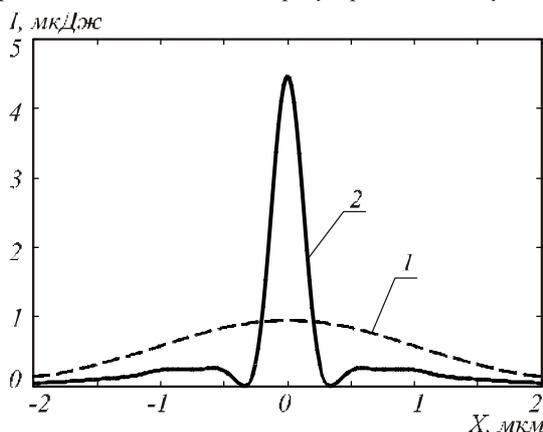


Рис. 3. Фокусировка импульса длиной 10 фс:
кривая 1 – падающая интенсивность,
кривая 2 – интенсивность сфокусированного излучения

Рассчитаем коэффициент фокусировки по следующей формуле:

$$k_f = \frac{I_{max}}{I_0}, \tag{3}$$

где k_f – коэффициент фокусировки, I_{max} – величина максимальной интенсивности сфокусированного излучения, I_0 – величина максимальной интенсивности падающего излучения.

В табл. 2 представлены параметры падающего и сфокусированного излучения:

Таблица 2. Параметры излучения

$t_s \cdot 10^{-15}$, с	t_d , мкм	I_{max} , мкДж	d_{FWHM} , мкм	k_f
1	0,085	1,0769	0,14	5,2251
4	0,35	3,9287	0,34	4,9152
10	0,9	4,4527	0,28	4,7029

где d_{FWHM} – диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности, k_f – коэффициент фокусировки.

Из представленных графиков видно, что чем меньше длина импульса, тем больше коэффициент фокусировки и тем сильнее фокусируется излучение. При этом стоит отметить, что импульс длиной в 1 фс обладает самой минимальной шириной фокусного пятна.

Заключение

Получены следующие результаты:

1. вследствие прохождения ультракороткого импульса через кварцевый цилиндр наблюдается фокусировка излучения;
2. коэффициент фокусировки и высота боковых лепестков зависит от длины входного импульса: чем короче импульс, тем больше коэффициент фокусировки и меньше высота лепестков;
3. минимальный диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности составляет 0,2632 от длины волны (для импульса длиной в 1 фс);
4. интенсивность в фокусе превышает интенсивность падающего излучения в 5,2251 раз (для импульса длиной в 1 фс).

Литература

1. **Yamane, K.** Optical Pulse Compression to 3.4 fs in the Monocycle Region by FeedBack Phase Compensation / K. Yamane, Z. Zhang, K. Oka, R. Morita, M. Yamashita // Optics Letters. – 2003. – V. 28(22) – P. 2258-2260.
2. **Hecht, J.** Spectral Broadening Advances Quest for Single-Cycle Pulses / J. Hecht // Laser Focus World. – 2011. – V. 47(8) – P. 65-70.
3. **Gai, H.** Modified Debye Model Parameters of Metals Applicable for Broadband Calculations / H. Gai, J. Wang, Q. Tian // Applied Optics. – 2007. – V. 46(12) – P. 2229-2232.
4. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
5. **Kempe, M.** Spatial and Temporal Transformation of Femtosecond Laser Pulses by Lenses and Lens Systems / V. Kempe, U. Stamm, B. Wilhelmi, W. Rudolph // J. Opt. Soc. Am. B. – 1992. – V. 9(7) – P. 1158-1165.
6. **Piglosiewicz, B.** Ultrasmall Bullets of Light – Focusing Few-Cycle Light Pulses to Diffraction Limit / B. Piglosiewicz, D. Sadiq, M. Masxheck, S. Schmidt, M. Silies, P. Vasa, C. Lienau // Optic Express. – 2011. – V. 19(7) – P. 14451-14463.
7. **Ахманов, С.А.** Оптика фемтосекундных лазерных импульсов / С.А. Ахманов, В.А. Выслоух, А.С. Чиркин. – М.: Наука, 1988. – 312 с.

References

1. **Yamane, K.** Optical Pulse Compression to 3.4 fs in the Monocycle Region by FeedBack Phase Compensation / K. Yamane, Z. Zhang, K. Oka, R. Morita, M. Yamashita // Optics Letters. – 2003. – V. 28(22) – P. 2258-2260.
2. **Hecht, J.** Spectral Broadening Advances Quest for Single-Cycle Pulses / J. Hecht // Laser Focus World. – 2011. – V. 47(8) – P. 65-70.
3. **Gai, H.** Modified Debye Model Parameters of Metals Applicable for Broadband Calculations / H. Gai, J. Wang, Q. Tian // Applied Optics. – 2007. – V. 46(12) – P. 2229-2232.
4. **Born, M.** Fundamentals of optics / M. Born, E. Wolf. – Moscow: “Nauka” Publisher, 1973. – 720 p. – (In Russian).
5. **Kempe, M.** Spatial and Temporal Transformation of Femtosecond Laser Pulses by Lenses and Lens Systems / V. Kempe, U. Stamm, B. Wilhelmi, W. Rudolph // J. Opt. Soc. Am. B. – 1992. – V. 9(7) – P. 1158-1165.
6. **Piglosiewicz, B.** Ultrasmall Bullets of Light – Focusing Few-Cycle Light Pulses to Diffraction Limit / B. Piglosiewicz, D. Sadiq, M. Masheck, S. Schmidt, M. Silies, P. Vasa, C. Lienau // Optic Express. – 2011. – V. 19(7) – P. 14451-14463.
7. **Ahmanov, S.A.** Optics of femtosecond laser pulses / S.A. Ahmanov, V.A. Vyslouh, A.S. Chirkin. – Moscow: “Nauka” Publisher, 1988. – 312 p. – (In Russian).

SIMULATION OF FOCUSING OF FEMTOSECOND LASER PULSE

E.S. Kozlova

Image Processing Systems Institute of the RAS,

S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

Using the FDTD-method and the Sellmeyer's dispersion model it is shown that the femtosecond Gaussian linear polarized laser pulse with planar wavefront focused near the surface of a quartz silica with with a diameter and a height slightly greater than the central wavelength in the focal spot with with almost no side lobes in diameter, depending on the duration of the pulse: for a pulse of 1 fs duration diameter of the focus on FWHM is 0.2632 of the wavelength.

Key words: permittivity, Sellmeyer's dispersion model, ultrashort pulse, focusing, silica cylinder.

Сведения об авторе



Козлова Елена Сергеевна, магистр прикладной математики и информатики, аспирант кафедры технической кибернетики Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы.

E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

Elena Sergeevna Kozlova, Master of Mathematics and Computer Science. Currently studies at Samara State Aerospace University. Research interests are diffractive optics and numerical methods.