

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ПЛОСКИМ ВОЛНАМ

С.В. Краснов

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

В данной работе проведено численное моделирование распространения лазерного импульса в свободном пространстве на основе метода разложения по плоским волнам. Метод программно реализован в среде Mathcad и использован для моделирования распространения импульсов с различными видами временных и пространственных спектров.

Ключевые слова: преобразование Фурье, разложение по плоским волнам, Гауссово распределение, прямоугольный импульс, треугольный импульс.

Введение

Импульсные лазерные пучки используются в различных областях науки и техники. Ниже приводится краткий обзор современных научных публикаций по генерации, исследованию и применению лазерного импульсного излучения.

В работах [1-4] обсуждаются проблемы генерации ультракоротких лазерных импульсов с различными характеристиками. В статье [1] рассматривается создание высококонтрастного фемтосекундного лазерного импульса с энергией до 32,3 Дж путем повышения эффективности усиления и повышения энергии накачки усилителя в 120 Дж на основе комбинированной схемы двойного усиления чирпированных импульсов (ДСРА) и фемтосекундного неколлинеарного оптико-параметрического усилителя (NOPA). В статье [2] теоретически исследован эффективный метод для создания изолированного короткого аттосекундного импульса. Широкополосные ультрафиолетовые гармоники суперконтинуума можно получить, когда модель иона He^+ подвергается комбинированному воздействию интенсивного цикла лазерных импульсов и низкочастотного поля. В работе [3] также рассматривается способ получения одиночного циклически поляризованного аттосекундного импульса с помощью интенсивного многоциклового эллиптически поляризованного лазерного импульса с терагерцовым полем, рассчитанного численным решением нестационарного уравнения Шредингера для молекулярного иона H_2^+ .

В статье [4] рассмотрена генерация одноступенчатого разночастотного ИК импульса с высокой энергией для двуцветных титан-сапфировых систем усиления. Оптимизированный процесс смешивания основан на генерации разночастотных чирпированных импульсов (CP-DFG), обеспечивает более высокий КПД преобразования, увеличивает пропускную способность и снижает потери поглощения фотонов.

Детальные исследования коротких лазерных импульсов представлены в работах [5, 6]. Статья [5] представляет собой систематическое исследование ультракороткого импульсного лазерного ускорения протонов, которое дает максимальные энергии

протонов около 17 МэВ в настольном титан-сапфировом лазере мощности 100 ТВт. В статье [6] предложена плазменная линза для создания высокоинтенсивного и высококонтрастного лазерного импульса с крутым фронтом. Когда интенсивный короткий циклически поляризованный Гауссов лазерный импульс распространяется в околокритической плазме, он наводит сильные токи релятивистских электронов, которые намагничивают плазму.

В работах [7-13] обсуждаются различные приложения импульсных пучков, такие как филаментация [7, 8], формирование периодических наноразмерных структур [9, 10], обработка материалов [11-13].

В статье [7] представлены прямые временные и пространственные измерения электронной плотности филаментов, индуцированных фемтосекундными лазерными импульсами. В статье [8] этот эффект сравнивают с гравитационными аналогами и астрофизическими черными дырами, обсуждают возможность возбуждения квантового вакуума и эмиссии квантов, известной как излучение Хокинга.

В статье [9] с помощью электронного микроскопа исследуются периодические структуры, самостоятельно формирующиеся на поверхности некоторых металлов при облучении фемтосекундными лазерными импульсами. Более детально о нанорешётках, созданных повторяющимися фемтосекундными лазерными импульсами в объеме боросиликатного стекла, рассказывается в статье [10]. Облучение создает небольшие нанопоры (10-20 нм), которые начинают самостоятельно организовываться в решетки.

Статья [11] является обзорной по использованию коротких лазерных импульсов для обработки материалов. В работе [12] обсуждается возможность управления лазерной абляцией с применением дифракционных оптических элементов в условиях острой фокусировке фемтосекундного излучения. А в статье [13] демонстрируют экспериментальные результаты формирования наноструктур при лазерной абляции золотых пленок.

Нужно отметить, что дифракционные решётки и пространственные модуляторы света [14, 15] часто используются для разделения или размножения импульсного пучка. Однако при этом необходимо учитывать спектральную дисперсию, сопровождающую короткие лазерные импульсы и приводящие к различным искажениям [16, 17].

Аналитические оценки для тестовых распределений

Пусть оптический сигнал на входе факторизуется по пространственной и временной координате:

$$U_0(x, t) = U_s(x)U_t(t), \quad x \in [-a, a], \quad t \in [0, \tau] \quad (1)$$

Рассмотрим тестовое пространственное распределение в виде прямоугольного распределения:

$$U_s(x) = \begin{cases} 1, & x \in [-x_0, x_0] \\ 0, & x \notin [-x_0, x_0] \end{cases}, \quad (2)$$

который имеет частотно-пространственный спектр:

$$A_s(\alpha, k) = \int_{-x_0}^{x_0} U_s(x) \cdot e^{-ik\alpha x} dx = \frac{2 \sin(x_0 \alpha k)}{\alpha k} \quad (3)$$

В качестве тестового временного распределения выберем Гауссово:

$$U_\tau(t) = e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{i\omega_0 t}, \quad (4)$$

имеющее соответствующий частотно-временной спектр:

$$A_\tau(k) = \int_{t_1}^{t_2} U_\tau(t) \cdot e^{-ikct} dt = \sqrt{2\pi\sigma} \cdot e^{-\frac{((kc-\omega_0)\sigma)^2}{2}} \quad (5)$$

Результаты моделирования

Мною была написана программа Mathcad, которая позволяет моделировать распространение лазерного импульса в свободном пространстве.

В качестве параметров задаются: диапазоны времени $t_{1,2}$ фс.; координаты $x_{1,2}$ мкм.; длины волны $\lambda_{1,2}$ мкм.; безразмерного параметра α : $\alpha_{1,2}$; параметр σ фс.

Значения параметров:

$$t \in (0; 15) \text{ фс} \quad x \in (-10; 10) \text{ мкм}$$

$$\lambda \in (0,4; 0,6) \text{ мкм}$$

$$k \in (10,472; 15,708) \frac{1}{\text{мкм}} \quad \alpha \in (-1; 1)$$

$$\sigma = 1 \text{ фс} \quad \omega_0 = 12 \frac{1}{\text{фс}}$$

$$t_0 = 10 \text{ фс}$$

$$\text{Скорость света} \quad c = 0,3 \frac{\text{мкм}}{\text{фс}}$$

На рис. 1 показано входное распределение по времени (4), а на рис. 2 соответствующий спектр, отсеченный в области отрицательных частот.

На рис. 3 показано исходное пространственное распределение (2), а на рис. 4 соответствующий спектр в зависимости от пространственных частот при заданном значении волнового числа $k=15 \text{ мкм}^{-1}$.

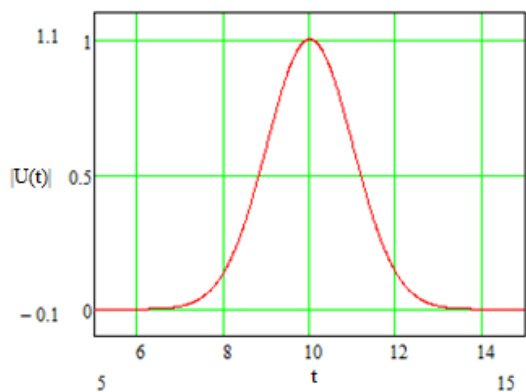


Рис. 1. Входная временная функция

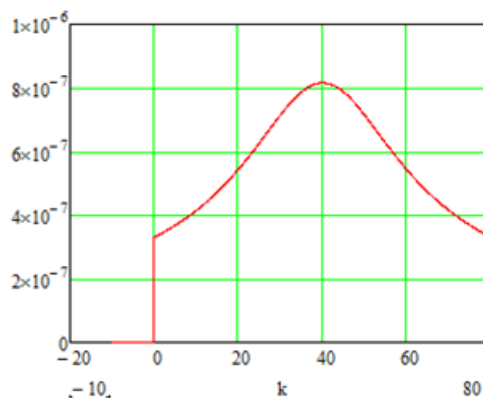


Рис. 2. Временной спектр

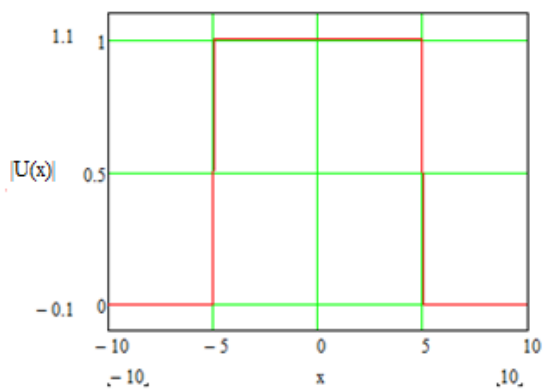


Рис. 3. Входная пространственная функция

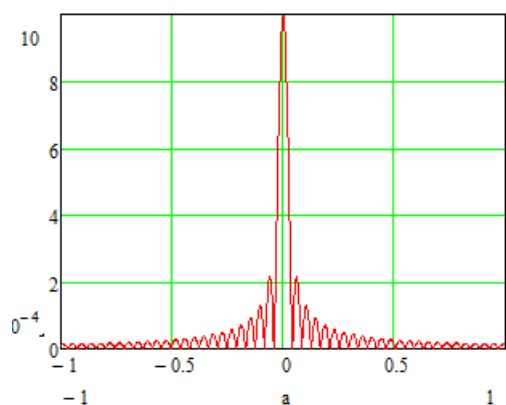


Рис. 4. Пространственный спектр

Комплексная амплитуда поля на расстоянии z от входной плоскости:

$$U(x, t, z) = \int_{-k_1}^{k_2} A_s(\alpha, k) \cdot A_r(k) \cdot \exp\left[ik(\alpha x + z\sqrt{1+\alpha^2} - ct)\right] dk d\alpha \quad (6)$$

Результаты расчетов для входных распределений (2) и (4) с использованием выражения (6) показаны на рис. 5-10 при различных фиксированных параметрах.

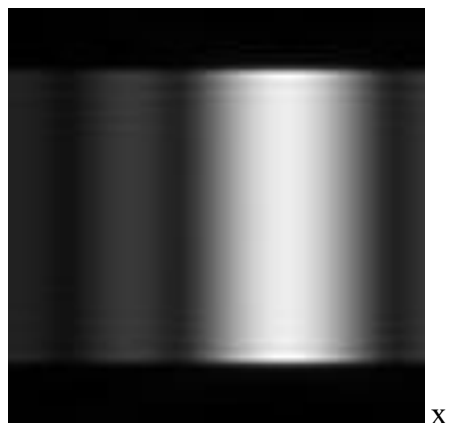


Рис. 5. Амплитуда поля в зависимости от времени на расстоянии z=0мкм

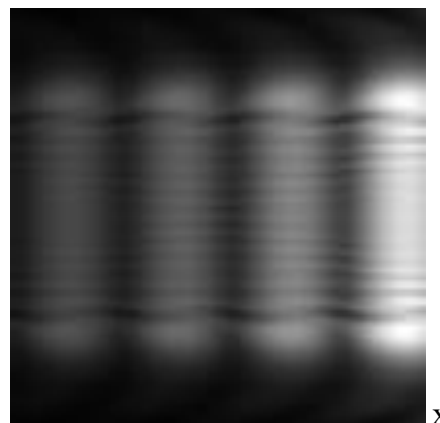


Рис. 6. Амплитуда поля в зависимости от времени на расстоянии z=3мкм

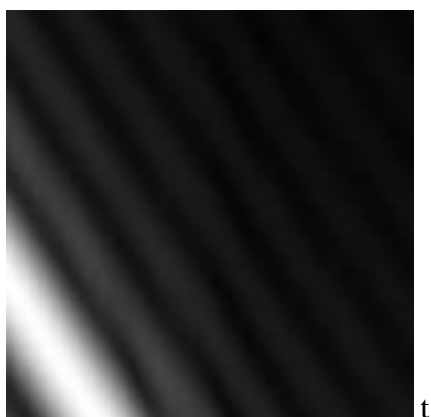


Рис. 7. Амплитуда поля при фиксированном x

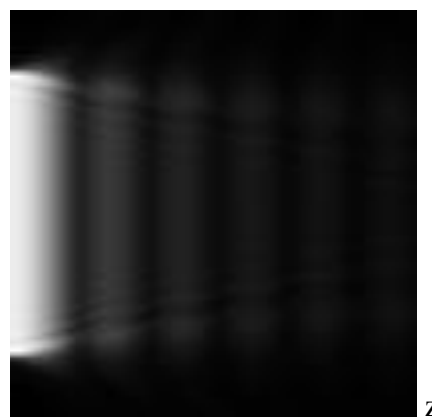


Рис. 8. Амплитуда поля при фиксированном t

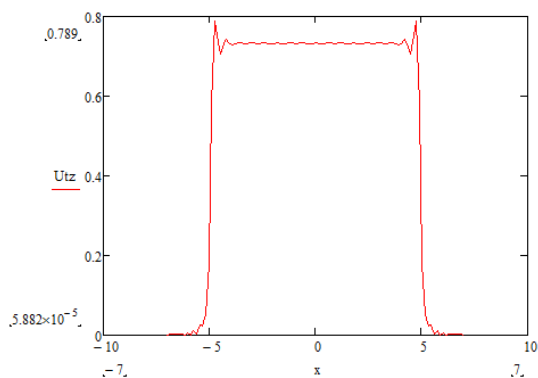


Рис. 9. Амплитуда поля при фиксированном $t=10\text{фс}$ и $z=0\text{мкм}$

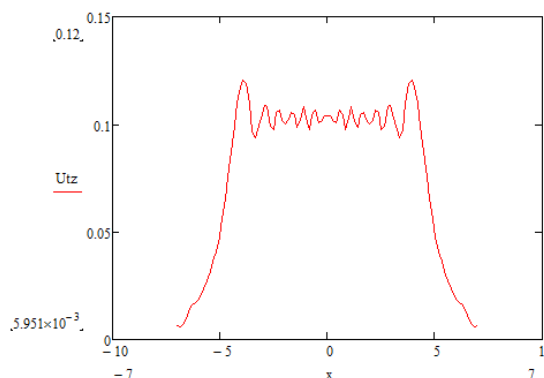


Рис. 10. Амплитуда поля при фиксированном $t=10\text{фс}$ и $z=3\text{мкм}$

Как следует из результатов моделирования, разработанная программа работает корректно, в соответствии с аналитическими оценками, полученными для тестовых распределений.

Заключение

В данной работе проведено численное моделирование распространения лазерного импульса в свободном пространстве на основе метода разложения по плоским волнам.

Разработанная программа успешно протестирована на примерах, для которых имеются аналитические выражения. В дальнейшем планируется использовать для исследования распространения более сложных распределений.

Литература

1. Zhaohua Wang, Cheng Liu, Zhongwei Shen. High-contrast 1.16 PW Ti: sapphire laser system combined with a doubled chirped-pulse amplification scheme and a femtosecond optical-parametric amplifier. Optics Letters / Vol. 36, No. 16 3194-3196p / August 15, 2011
2. Hongchuan Du, Huiqiao Wang, Bitao Hu. Isolated short attosecond pulse generated using a two-color laser and a high-order pulse. Physical Review Letters Vol. 81 063813-4p / 2013
3. Kai-Jun Yuan, Andre D. Bandrauk. Single Circularly Polarized Attosecond Pulse Generation by Intense Few Cycle Elliptically Polarized Laser Pulses and Terahertz Fields from Molecular Media. Physical Review Letters Vol. 110 023003-5p / 2013

4. Christian Erny, Christoph P. Hauri. Design of efficient single stage chirped pulse difference frequency generation at 7 μm driven by a dual wavelength Ti:sapphire laser. *Applied Physics B* Vol. 17 379-387p / 2014
5. K Zeil, S D Kraft, S Bock, M Bussmann. The scaling of proton energies in ultrashort pulse laser plasma acceleration. *New Journal of Physics* Vol. 12 045015-15p / 2010
6. H. Y. Wang, C. Lin., Z. M. Sheng. Laser Shaping of a Relativistic Intense, Short Gaussian Pulse by a Plasma Lens. *Physical Review Letters* Vol. 107 265002-5p / 2011
7. Y.-H. Chen, S. Varma, T. M. Antonsen. Direct measurement of the electron density of extended femtosecond laser pulse-induced filaments. *Phys. Rev. Lett.* Vol. 105 215005 -12p / 2010
8. F. Belgiorno, S.L. Cacciatori, M. Clerici, V. Gorini. Hawking radiation from ultrashort laser pulse filaments. *Phys. Rev. Lett.* Vol. 105 203901-4p / 2010
9. Kiminori Okamoto, Masaki Hashida, Yasuhiro Miyasaka. Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation. *Physical Review B* Vol. 82 165417-5p / 2010
10. Felix Zimmermann, Anton Plech, Soren Richter. Ultrashort laser pulse induced nanogratings in borosilicate glass. *Applied Physicak Letters* Vol. 104 211107-5p / 2014
11. Cheng, J. A review of ultrafast laser materials micro-machining / J. Cheng, C. Liu, S. Shang, D. Liu, W. Perrie, G. Dearden and K. Watkins // *Optics and Laser Technology*. – 2013. – Vol. 46. – P. 88-102
12. Алфёров, С.В. О возможности управления лазерной абляцией при острой фокусировке фемтосекундного излучения / Алфёров С.В., Карпеев С.В., Хонина С.Н., Тукмаков К.Н., Моисеев О.Ю., Шуляпов С.А., Иванов К.А., Савельев-Трофимов А.Б. // *Квантовая электроника*. – 2014. – Т. 44, № 11. – С. 1061-1065
13. Заярный, Д.А. Наномасштабные процессы кипения при одноимпульсной фемтосекундной лазерной абляции золотых пленок / Заярный Д.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Руденко А.А., Бежанов С.Г., Урюпин С.А., Канавин А.П., Емельянов В.И., Алферов С.В., Хонина С.Н., Карпеев С.В., Кучмижак А.А., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н., Макаров С.В. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2015. - Т. 101, № 5-6. – С. 428-432
14. Kuroiwa, Y. Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements / Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka and K. Hirao // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12(9). – P. 1908-1915.
15. Hayasaki, Y. Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator / Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita and N. Nishida // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 87(3). – P. 031101
16. Карпеев, С.В. Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом / Карпеев С.В., Алфёров С.В., Хонина С.Н., Кудряшов С.И. // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 689-694
17. Хонина, С.Н. Исследование фокусировки в близкорасположенные световые пятна при освещении дифракционных оптических элементов коротким импульсным лазерным пучком / Хонина С.Н., Дегтярев С.А., Порфирьев А.П., Моисеев О.Ю., Полетаев С.Д., Ларькин А.С., Савельев-Трофимов А.Б. // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 187-196.