

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СВЕТОВОГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ ДИФРАКЦИОННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

А.П. Краснов<sup>1,2</sup>, А.В. Игнатъев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия,

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

В настоящей работе проводится моделирование прохождения сфокусированного импульсного Гауссова пучка через фазовый оптический элемент, предназначенный для деления падающего пучка на два близкорасположенных световых пятна. Моделирование выполняется на основе метода конечных разностей во временной области, реализованного в программном обеспечении МЕЕР.

**Ключевые слова:** импульсный световой пучок, фазовый оптический элемент, метод конечных разностей во временной области

## Введение

Одним из важнейших достижений лазерных технологий является возможность генерации очень коротких лазерных импульсов, которые нашли широкое применение в обработке материалов [1, 2]. При этом часто требуется структурировать гауссов пучок – разделять, размножать, формировать определенные конфигурации. Наиболее широкий спектр пространственных преобразований лазерного излучения обеспечивают средства дифракционной оптики [3, 4]. Чаще всего используются дифракционные решётки и пространственные модуляторы света [5, 6]. Однако структура дифракционных элементов такова, что изготовленный микрорельеф является оптимальным для монохроматического излучения. Спектральная дисперсия, сопровождающая короткие лазерные импульсы, приводит к различным искажениям, которые необходимо учитывать [7, 8].

Большинство теоретических и численных исследований в этой области основано на методе разложения по плоским волнам. Однако этот метод не позволяет учитывать трёхмерную структуру элементов, через которые проходит импульсный пучок. Одним из способов решения этой проблемы является моделирование с использованием метода конечных разностей во временной области (метода FDTD).

В настоящей работе проводится моделирование прохождения импульсного гауссова пучка через фазовый оптический элемент, предназначенный для деления падающего пучка на два близкорасположенных световых пятна. Задача формирования нескольких световых пятен на пределе дифракционного разрешения [7-9] имеет место при абляции. Моделирование выполняется при помощи метода FDTD, реализованного в программном обеспечении МЕЕР [10].

## 1. Моделирование в программном пакете МЕЕР

В свободно распространяемом программном обеспечении МЕЕР используется система единиц, в которой скорость света, электрическая и магнитная постоянная принимаются за единицу. Это означает, что за единицу времени свет проходит в вакууме единицу расстояния. Выбор единиц измерения определяется тем, как мы интерпретируем один из параметров. Например, если мы ставим в соответствие единице расстояния линейный размер в 1 мкм, то единица времени в стандартных величинах составляет примерно  $3,3 \cdot 10^{-15} \text{ c} = 3,3 \text{ фс}$ .

Осуществим двумерное моделирование. Толщину идеально согласованного слоя выберем равной 1 мкм. Размеры расчётной области:  $48 \text{ мкм} \times 16 \text{ мкм}$ .

Подадим на вход гауссов пучок:

$$A(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\sigma = 4 \text{ мкм}$ .

Пучок (1) генерируется в плоскости  $z = 1 \text{ мкм}$ . Длина волны падающего излучения  $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$ .

В работе сравнивается прохождение непрерывного излучения и импульса, который задаётся формулой:

$$A(t) = \exp\left\{-\frac{(t-t_0)^2}{2w^2}\right\} \exp\{i\omega(t-t_0)\}, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi c/\lambda$ ,  $w = 3,3 \text{ фс}$  или  $w = 16,7 \text{ фс}$ .

Рассмотрим два варианта оптической системы. В первом случае система состоит из одной собирающей линзы, во втором случае линза дополнена фазовым элементом, осуществляющим линейный скачок фазы на  $\pi$  радиан. Линза и фазовый элемент выполнены из стекла с показателем преломления  $n = 1,5$ .

Плосковыпуклая линза имеет радиус выпуклой поверхности  $R_1 = 12 \text{ мкм}$ , отсюда фокусное расстояние  $f \approx \frac{n_0 R_1}{n - n_0} = \frac{R_1}{n - 1} = 24 \text{ мкм}$ . Плоская поверхность линзы находится в плоскости  $z = 8 \text{ мкм}$ . Толщина линзы  $d = 3,5 \text{ мкм}$ .

Фазовый элемент начинается на расстоянии  $z = 9,5 \text{ мкм}$  и состоит из двух совмещённых пластин. Большая пластина имеет толщину  $H = 1 \text{ мкм}$  и поперечный размер, равный диаметру линзы. Малая пластина имеет толщину  $h = \frac{\lambda}{2(n - n_0)} = \frac{\lambda}{2(n - 1)}$  и поперечный

размер, равный радиусу линзы, при этом она занимает нижнюю половину установки. Для заданного  $n=1,5$  получаем  $h=\lambda$ .

Число отсчётов зависит от заданного разрешения. Разрешение должно быть не меньше, чем 10 отсчётов на одну длину волны. Выберем разрешение, равное 20 отсчётам на 1 мкм.

Сначала рассмотрим фокусировку непрерывного Гауссова пучка линзой. На рисунке 1 показано изображение продольного сечения амплитуды электромагнитного поля в момент времени  $t=150\phi c$ , а на рисунке 2 – графики интенсивности в продольном сечении вдоль оптической оси и в поперечном сечении вблизи фокуса. Хорошо наблюдается факт фокусировки пучка на расстоянии около 20 мкм от линзы.

Если дополнить линзу фазовым оптическим элементом, вносящим в сфокусированный пучок скачок фазы на  $\pi$  радиан, то в месте скачка сформируется нулевая интенсивность, связанная с деструктивной интерференцией двух частей пучка, складывающихся на оптической оси в противофазе [11-14]. На рисунке 3 представлены изображение продольного сечения амплитуды электромагнитного поля и график интенсивности в поперечном сечении вблизи фокуса в момент времени  $t=150\phi c$ . Как видно, фокус стал менее компактным, и вдоль оптической оси появилась область нулевой интенсивности. На рис. 3а хорошо виден фазовый сдвиг на  $\lambda/2$  между верхней и нижней частями пучка.

Далее рассмотрим вместо непрерывного пучка короткий импульс вида (2) с  $w=3,3\phi c$ . Соответствующие результаты представлены на рисунках 5-7.

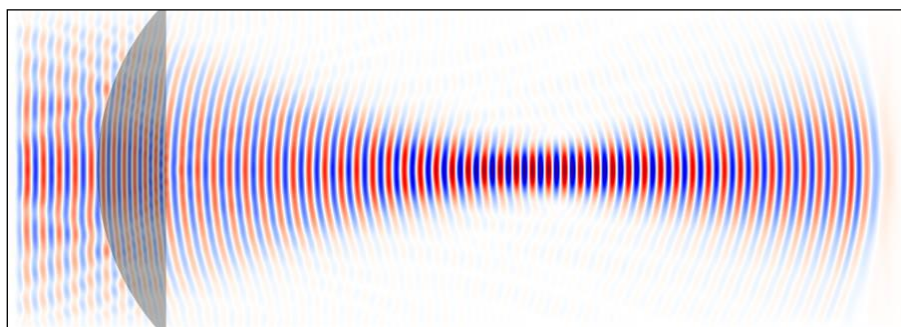


Рис. 1. Фокусировка непрерывного пучка линзой – продольное сечение амплитуды в момент  $t=150\phi c$

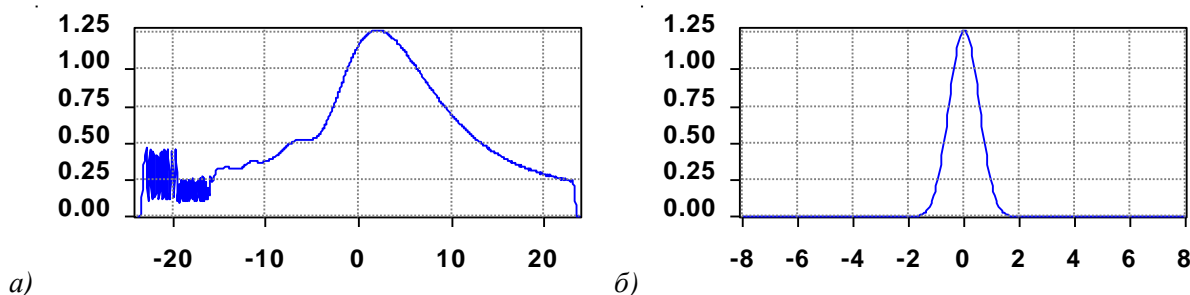


Рис. 2. Фокусировка непрерывного пучка линзой: а) график продольного сечения интенсивности вдоль оптической оси и б) график поперечного сечения интенсивности вблизи фокуса

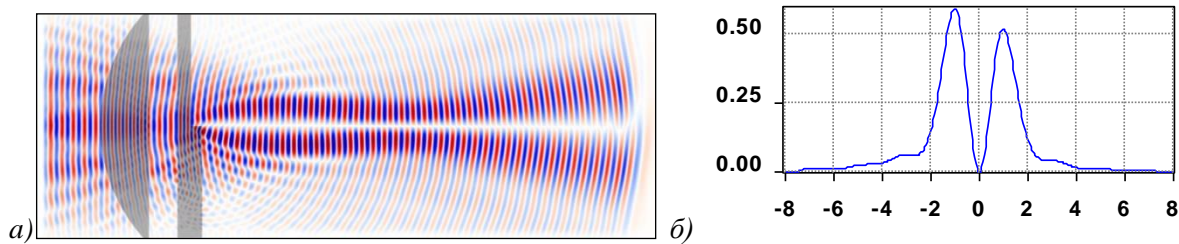


Рис. 3. Фокусировка непрерывного пучка линзой, дополненной фазовым элементом: а) изображение продольного сечения амплитуды, б) график поперечного сечения интенсивности вблизи фокуса,  $t = 150 \text{ фс}$

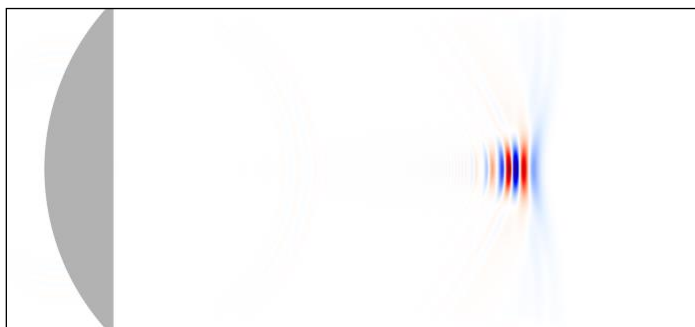


Рис. 4. Фокусировка импульса ( $w = 3,3 \text{ фс}$ ) линзой - изображение продольного сечения амплитуды,  $t = 100 \text{ фс}$

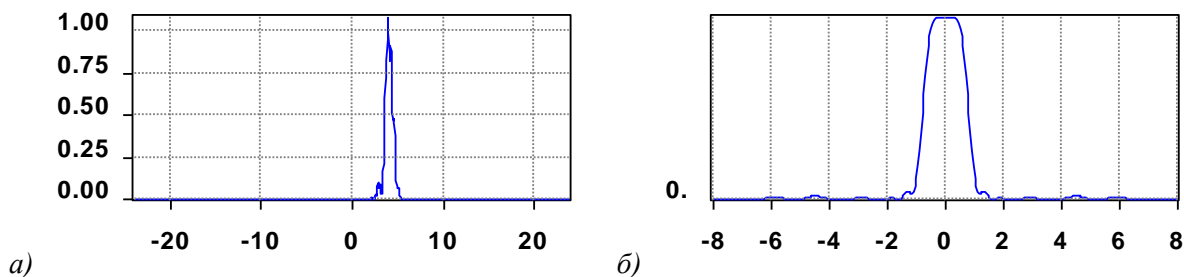


Рис. 5. Фокусировка импульса ( $w = 3,3 \text{ фс}$ ) линзой: а) график продольного сечения интенсивности вдоль оптической оси и б) график поперечного сечения интенсивности вблизи фокуса

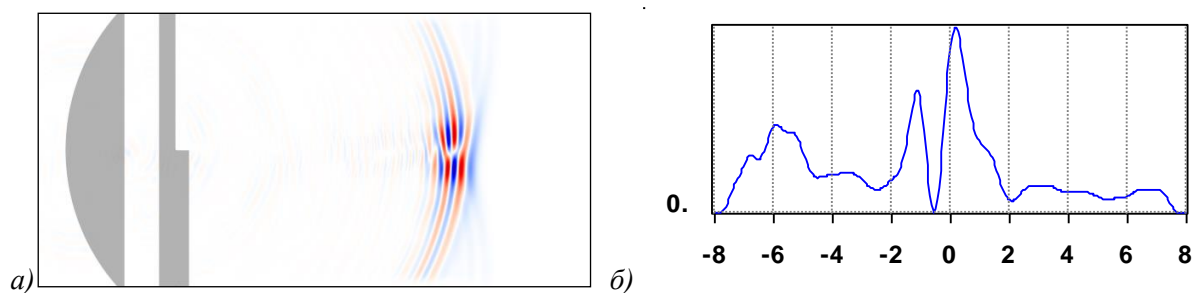


Рис. 6. Фокусировка импульса ( $w = 3,3 \text{ фс}$ ) линзой, дополненной фазовым элементом: а) изображение продольного сечения амплитуды, б) график поперечного сечения интенсивности вблизи фокуса,  $t = 100 \text{ фс}$

На рис. 5 и 6 показаны результаты фокусировки короткого импульса в момент времени  $t = 100 \text{ фс}$ . На рис. 6б видно, что при фокусировке короткого пучка, фокальное пятно становится шире, приобретая форму супергауссова распределения.

При дополнении линзы фазовым элементом получим результаты, показанные на рисунке 7. Как видно, фокус стал менее компактным, область нулевой интенсивности менее

выражена, чем в случае непрерывного пучка. Появились искажения, связанные с короткой длительностью импульса и уширением спектра [7-9]. Тем не менее, нулевое значение интенсивности присутствует в области фокуса даже для очень короткого импульса, что говорит о возможности применения дифракционных оптических элементов для пространственного структурирования таких пучков.

## Заключение

Моделирование прохождения сфокусированного импульсного гауссова пучка через фазовый оптический элемент методом FDTD показал заметные искажения, которые появляются в области фокуса, по сравнению с постоянным излучением. Однако характерные особенности структуры формируемого пучка, в частности, нулевое значение интенсивности, связанное с фазовой сингулярностью, вносимой дифракционным элементом, сохраняются.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, а также грантов РФФИ №16-07-00825, №16-37-00241.

## Литература

1. 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
2. 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
3. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головаш-кин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина. – Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
4. Дифракционная нанофотоника / А.В. Гаврилов, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, П.Н. Дьяченко, А.А. Ковалёв, В.В. Котляр, А.Г. Налимов, Д.В. Нестеренко, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина, Я.О. Шулюпова. – Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2011. – 680 с.
5. 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.
6. 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.
7. 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
8. 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
9. 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

10. Oskooi, A.F. Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method / Oskooi A.F., Roundy D., Ibanescu M., Bermel P., Joannopoulos J.D. and Johnson S.G. // Computer Physics Communications. – 2010. – V. 181. – P. 687-702
11. Котляр, В.В. Обобщенные Эрмитовы световые пучки в свободном пространстве / Котляр В.В., Сойфер В.А., Хонина С.Н. // Компьютерная оптика. – 1997. – Т. 17. – С. 31-36.
12. Хонина, С.Н. Саморепродукция многомодовых пучков Гаусса-Эрмита / Хонина С.Н., Котляр В.В., Сойфер В.А. // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, № 12. – С. 62-69
13. Хонина С.Н. Экспериментальное формирование и селекция мод Гаусса-Эрмита с помощью ДОО / Хонина С.Н. // Компьютерная оптика. – 2002. – Т. 23. – С. 15-22
14. Хонина, С.Н. Исследование поляризационной чувствительности ближнепольного микроскопа с использованием бинарной фазовой пластины / Хонина С.Н., Алфёров С.В., Карпеев С.В., Моисеев О.Ю. // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 326-331.