

УДК 535.31

**ОСОБЕННОСТИ ФОКУСИРОВКИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ  
ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ**

© 2011 г.

*С.Н. Жуков, И.С. Жукова, Н.Е. Михайлычев*

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

jsn@rf.unn.ru

*Поступила в редакцию 18.05.2011*

Методами численного моделирования на основе преобразования Фурье исследованы особенности фокусировки широкополосных импульсов терагерцового диапазона частот плоско-выпуклой цилиндрической линзой. Рассмотрение проведено как для модельного импульса с гауссовым пространственно-временным профилем, так и для реального терагерцового поля, полученного методом оптического выпрямления фемтосекундного лазерного импульса в электрооптическом кристалле. Показано, что различные спектральные составляющие импульса фокусируются в различных точках на оси линзы.

*Ключевые слова:* терагерцовое излучение, фокусировка импульсов, фурье-оптика.

**Введение**

Широкополосная спектроскопия в терагерцовом диапазоне частот – быстро развивающаяся область исследований с перспективными научными и практическими применениями [1]. Для спектроскопических целей обычно используют три типа источников импульсного терагерцового излучения – фотопроводящие антенны, терагерцовую фотоэмиссию с поверхности полупроводника и оптическое выпрямление фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах. Во всех этих случаях эмиссия терагерцового излучения происходит из области фокусировки лазерного импульса накачки с размерами менее длины терагерцовой волны (300 мкм на частоте 1 ТГц). При этом имеет место сильная дифракционная расходимость терагерцового излучения, к тому же, существенно отличающаяся для различных спектральных компонент широкополосного импульса. В связи с этим для расчета коллимации и фокусировки терагерцового излучения с помощью параболических зеркал и линз оказываются неприменимыми методы геометрической и параксиальной оптики. В настоящей работе для решения задачи фокусировки линзой импульсов с заданным пространственно-временным профилем предлагается использовать методы фурье-оптики, не вводящие ограничения на структуру импульсов и состав фокусирующей системы.

**Фокусировка гауссова импульса**

Пусть плоско-выпуклая цилиндрическая линза радиусом  $R$ , радиусом кривизны  $R_L$  и коэффициентом преломления  $n$  располагается в плоскости  $z = z_1$  между входной ( $z = 0$ ) и выходной ( $z = z_2$ ) плоскостями (см. рис. 1).

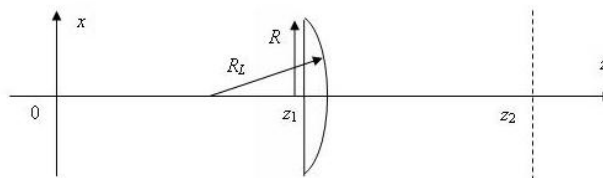


Рис. 1. Геометрия фокусирующей системы

Рассмотрим монохроматическое волновое поле с частотой  $\omega$ , заданное во входной плоскости спектром пространственных частот

$$S_0(g) = \frac{Al_{\perp}}{2\sqrt{\pi}} \exp(-g^2 l_{\perp}^2 / 4), \quad (1)$$

где  $g$  – поперечное волновое число,  $l_{\perp}$  – характерная ширина волнового фронта. Спектру (1) соответствует гауссов профиль амплитуды поля в зависимости от поперечной координаты  $x$ :

$$f(x) = A \exp(-x^2 / l_{\perp}^2).$$

Пространственный спектр поля непосредственно перед линзой, при  $z = z_1$ , получим, домножив спектр (1) на передаточную характеристику свободного пространства

$$S_1(g) = S_0 \exp(-ik_{\nu} z_1), \quad (2)$$

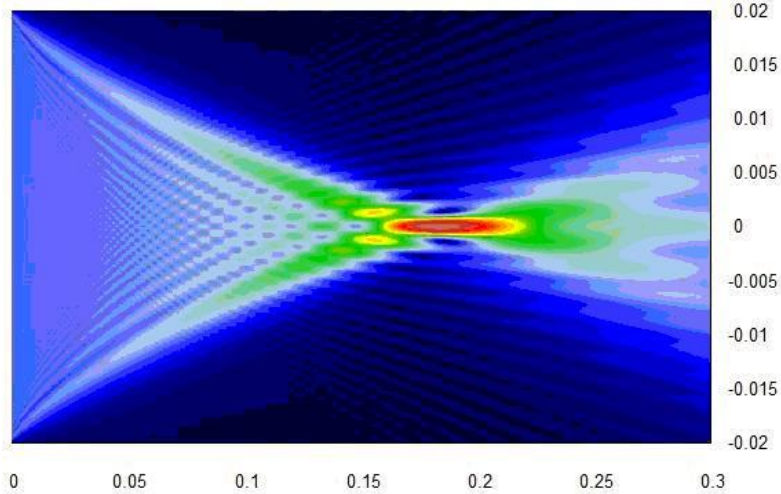


Рис. 2. Распределение интенсивности монохроматического волнового поля с частотой 1 ТГц за линзой

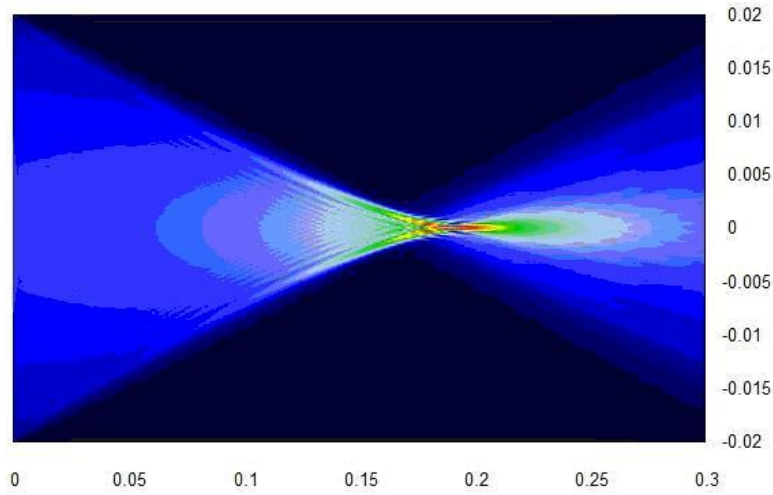


Рис. 3. Распределение интенсивности монохроматического волнового поля с частотой 5 ТГц за линзой

где  $k_v = \sqrt{\omega^2/c^2 - g^2}$  – продольное волновое число,  $c$  – скорость света в вакууме.

Пространственное распределение волнового поля перед линзой  $f_1(x)$ , найденное при помощи преобразования Фурье из спектра (2), будет связано с распределением поля непосредственно за линзой  $f_2(x)$  соотношением

$$f_2(x) = f_1(x)T(x). \quad (3)$$

Здесь  $T(x)$  – модуляционная характеристика тонкой плоско-выпуклой линзы

$$T(x) = P(x) \exp(-ik(\Delta_0 + (n-1) \times (\Delta_0 - R_L + \sqrt{R_L^2 - x^2}))),$$

функция

$$P(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq R \\ 0, & |x| > R \end{cases}$$

учитывает конечность апертуры линзы,  $\Delta_0$  – толщина линзы при  $x = 0$ ,  $k = \omega/c$  – волновое число.

Зная распределение волнового поля (3), рассчитаем при помощи преобразования Фурье его пространственный спектр  $S_2(\omega)$  и, домножив на передаточную характеристику свободного пространства, найдем пространственный спектр поля в выходной плоскости  $z = z_2$ :

$$S_3(g) = S_2(g) \exp[-ik_v(z_2 - z_1)].$$

Далее, при помощи обратного преобразования Фурье, получим распределение волнового поля в выходной плоскости.

На рис. 2, 3 приведены качественные зависимости интенсивности волнового поля после линзы для двух частот монохроматического поля. Радиус линзы  $R$  взят равным 2 см, радиус кривизны линзы  $R_L = 5$  см, коэффициент преломления  $n = 1,5$ ,  $l_1 = 180$  мкм. Из рисунков видно, что с увеличением частоты зона фокусировки смещается, ее размеры уменьшаются, а интенсивность поля растет. Таким образом, фокусировка волновых полей с отличающимися

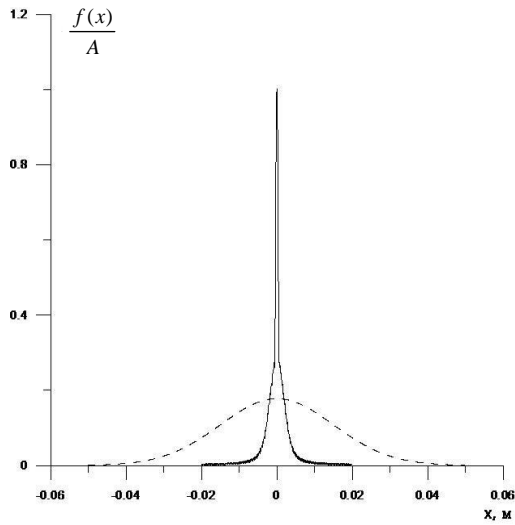


Рис. 4. Нормированное пространственное распределение волнового поля терагерцового импульса непосредственно перед линзой (пунктирная кривая) и в ее фокальной плоскости (сплошная кривая)

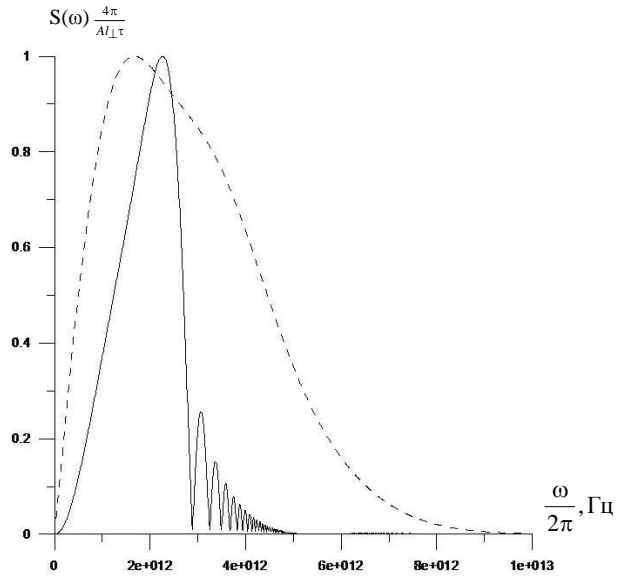


Рис. 5. Нормированные временные спектры импульса с гауссовой огибающей (пунктирная линия) и терагерцового импульса (сплошная кривая) в фокальной плоскости

частотами происходит в различных точках на оси линзы.

Для моделирования фокусировки линзой некогерентных импульсов можно использовать модельный импульс с пространственной и временной гауссовыми огибающими

$$f(z, x, t) = A e^{-\frac{x^2}{l_{\perp}^2}} e^{-\frac{t^2}{\tau^2}},$$

где  $\tau$  – характерная длительность импульса, спектр которого имеет вид

$$S_0(g, \omega) = \frac{A l_{\perp} \tau}{4\pi} e^{-\frac{g^2 l_{\perp}^2}{4}} e^{-\frac{\omega^2 \tau^2}{4}}.$$

В этом случае необходимо провести расчет пространственного спектра в выходной плоскости для всех частот диапазона. Далее, выполнив обратное преобразование Фурье во временную область, можно получить зависимость волнового поля от времени на выходе из системы.

### Фокусировка ультракороткого терагерцового импульса

Воспользуемся приведенной выше методикой для расчета фокусировки терагерцовой волны, возбуждаемой при оптической ректификации ТМ-поляризованного ультракороткого лазерного импульса с амплитудой  $E_0$ , распространяющегося со скоростью  $V = c/n_g$ , где  $n_g$  – оптический групповой показатель преломления, через нелинейный кристалл ZnTe с толщиной  $d$

[4]. Спектр волнового поля импульса на выходе из кристалла имеет следующий вид:

$$S_0(g, \omega) = \frac{p_y l_{\perp} \tau}{c^2 k_c^2 / \omega^2 - n_g^2} e^{-\frac{g^2 l_{\perp}^2}{4}} e^{-\frac{\omega^2 \tau^2}{4}} \times \left( \frac{k_v + \omega/V}{k_v + k_c} e^{-i k_c d} - e^{-\frac{i \omega d}{V}} \right),$$

где  $p_y = \sqrt{4/3} d_{14} E_0^2$  – максимальная амплитуда нелинейной поляризации,  $d_{14}$  – нелинейный коэффициент,  $k_c = \sqrt{\omega^2 \epsilon_c / c^2 - g^2}$  – продольное волновое число в кристалле. Диэлектрическую проницаемость кристалла  $\epsilon_c$  запишем в приближении однофононного резонанса

$$\epsilon_c = \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}) \omega_{TO}^2}{\omega_{TO}^2 - \omega^2 + i \gamma \omega},$$

где  $\epsilon_0$  и  $\epsilon_{\infty}$  – соответственно статическая и фононовая диэлектрические проницаемости кристалла,  $\omega_{TO}$  – частота поперечных оптических фононов,  $\gamma$  – постоянная затухания.

При расчетах были взяты следующие значения параметров:  $d = 1.2$  мм,  $d_{14} = 68$  пм/В,  $n_g = 3.28$ ,  $\epsilon_0 = 10$ ,  $\epsilon_{\infty} = 7.44$ ,  $\omega_{TO}/2\pi = 5.32$  ТГц,  $\gamma/2\pi = 0.005$  ТГц,  $l_{\perp} = 180$  мкм,  $\tau = 90$  фс.

Нормированное пространственное распределение волнового поля терагерцового импульса непосредственно перед линзой и в ее фокальной

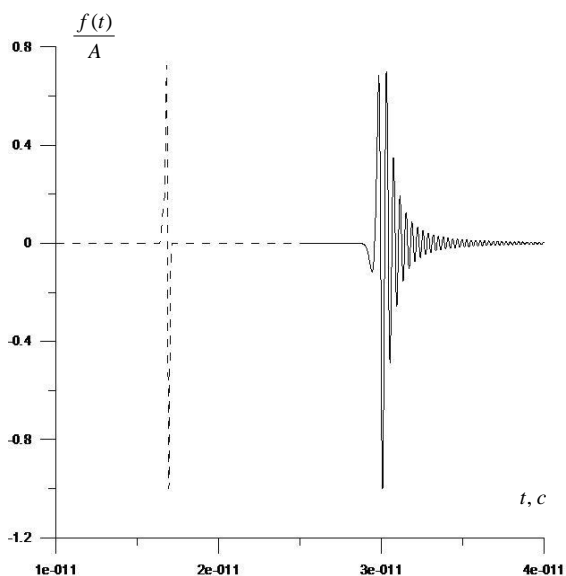


Рис. 6. Нормированные осциллограммы импульса с гауссовой огибающей (пунктирная линия) и терагерцевого импульса (сплошная кривая) в фокальной плоскости.

плоскости, приведено на рис. 4. Расчеты показывают, что в то время как пространственное распределение терагерцевого импульса и гауссова импульса с одинаковыми характерной шириной и длительностью совпадает, спектры импульсов по временной частоте оказываются различными (см. рис. 5). Осциллограммы соответствующих полученным спектрам нормированных сигналов приведены на рис. 6.

## Выводы

Таким образом, из-за широкополосности временного спектра терагерцевого импульса, фокусировка линзой импульсов с центральными частотами, меньшими 1 ТГц, практически неосуществима, т.к. зона фокусировки нелокализована. При моделировании пространственного распределения волнового поля терагерцевых импульсов может быть использована модель импульса с гауссовой огибающей, в то время как вид временных спектров и сигналов модельного и реального импульсов существенно различен.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 10-02-00476-а и 11-02-92107-ЯФ\_а), проектов ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракты 02.740.11.0563, № ПЗ85) и Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (грант 11.G34.31.0011).*

## Список литературы

1. Cook D.J. and Hochstrasser R.M. // Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 1210.
2. Holzman J.F., Vermeulen F.E., and Elezzabi Y. // J. Opt. Soc. Am. B. 2000. V. 17. P. 1457.
3. Goodman J.W. Introduction to Fourier Optics. Roberts & Company Publishers. 2004. 491 p.
4. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Maslov A.V., and Hanyo M. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 085346.

## SOME FEATURES OF BROADBAND TERAHERTZ PULSE FOCUSING

*S.N. Zhukov, I.S. Zhukova, N.E. Mikhailychev*

Some features of broadband terahertz pulse focusing by a plano-convex cylindrical lens are numerically simulated and studied on the basis of the Fourier transform. We consider both the model pulse with a Gaussian space-time profile and a real terahertz pulse produced by the optical rectification of a p-polarized ultra-short laser pulse propagating through the electrooptic crystal. It is shown that different pulse spectral components are focused at different points on the lens axis.

*Keywords:* terahertz radiation, pulse focusing, Fourier optics.