

## Поведение двумерных предельно коротких оптических импульсов в присутствии постоянного магнитного поля

Е. Н. Галкина<sup>1,2,\*</sup> М. Б. Белоненко<sup>2,3†</sup>

<sup>1</sup>Волгоградский Государственный Медицинский Университет, кафедра математики и информатики  
Россия 400131, Волгоград, пл. Павших Борцов, д. 1

<sup>2</sup>Волгоградский Институт Бизнеса, кафедра информатики и математики  
Россия 400010, Волгоград, ул. Качинцев, д. 63.

<sup>3</sup>Волгоградский Государственный Университет,  
кафедра судебной экспертизы и физического материаловедения  
Россия 400062, Волгоград, пр. Университетский, д. 100.

Проанализированы и представлены особенности поведения двумерных предельно коротких оптических импульсов, распространяющихся в массиве углеродных нанотрубок в присутствии внешнего постоянного магнитного поля, приложенного перпендикулярно оси нанотрубок.

PACS: 72.20.Ht, 42.65.Re.

УДК: 535.2.

Ключевые слова: двумерный предельно короткий импульс, магнитное поле, углеродные нанотрубки.

В настоящее время одним из популярных направлений современной оптики, является создание устройств, при помощи которых можно обрабатывать и управлять оптическими сигналами. Одним из перспективных материалов для конструирования электронных устройств, благодаря уникальным электрофизическим свойствам и стабильной структуре, являются углеродные нанотрубки [1]. Несмотря на огромное количество работ по изучению динамики электромагнитных волн в системах углеродных наноструктур, в том числе и с приложенными внешними электрическими и магнитными полями [2, 3], по сей день остаются неизученными вопросы, связанные с действием внешних электрических и магнитных полей на распространение двумерных предельно коротких оптических импульсов в системе углеродных нанотрубок. В данной работе представлено решение задачи о распространении двумерного предельно короткого импульса в случае, когда

постоянное магнитное поле перпендикулярно оси углеродной нанотрубки. Как показано в [4] в данном случае одноэлектронный спектр не может быть найден точно, что вызывает необходимость применять численные методы для анализа отличий, связанных с присутствием и отсутствием в системе постоянного магнитного поля.

Исследование электронной структуры углеродных нанотрубок проводилось в рамках анализа динамики  $\pi$ -электронов в приближении сильной связи. Рассматривалось распространение электромагнитных импульсов в системе углеродных нанотрубок в присутствии внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно оси углеродных нанотрубок.

Для углеродных нанотрубок типа zig-zag  $(m,0)$  закон дисперсии электронов в присутствии магнитного поля, параллельного оси нанотрубки есть [4]:

$$\varepsilon_s(k_x, k_z, H) = \pm \gamma \sqrt{1 + 4\cos\left(\frac{\sqrt{3}ak_x}{2}\right) \cos\left(\frac{3ak_z}{2}\right) + 4\cos^2\left(\frac{\sqrt{3}ak_x}{2}\right)}, \quad (1)$$

где  $a = 1.4 \text{ \AA}$ ,  $\gamma \approx 2.7 \text{ эВ}$ ,  $k_x = \frac{2\pi}{\sqrt{3}am} \left(s + \frac{\Phi}{\Phi_0}\right)$ ,  $k_z$  — волновой вектор вдоль оси трубки,  $\Phi$  — магнитный поток через поперечное сечение трубки,  $\Phi_0 = \frac{hc}{e}$ ,  $s = 1, 2, \dots, m$ .

Посредством численного анализа, было получено уравнение, описывающее эволюцию электромагнитного поля импульса в массиве углеродных нанотрубок:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \tau^2} - \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \zeta^2} \right) + \eta \sum_{s=1}^m \sum_{r=1}^{\infty} G_{r,s} \sin \{r\Psi\} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\Psi = Aed_x/c\hbar$  — безразмерная проек-

ция вектор-потенциала на ось  $x$ ,  $\Phi = \phi ed_x/c\hbar$ ,  $\tau = \omega_0 t / \sqrt{\varepsilon}$  — безразмерное время,  $\xi = x\omega_0/c$ ,  $\zeta = y\omega_0/c$  — безразмерные координаты.

Далее исследуемые уравнения (1) решались численно на основе конечно-разностной схемы типа крест.

Эволюция двумерного предельно короткого импульса в системе углеродных нанотрубок в присутствии внешнего постоянного магнитного поля в зависимости от времени распространения импульса представлена на рис. 1.

Эволюция двумерного предельно короткого импульса, распространяющегося в системе углеродных нано-

трубок, в присутствии внешнего постоянного магнитного поля в зависимости от его величины представлена на рис. 2.

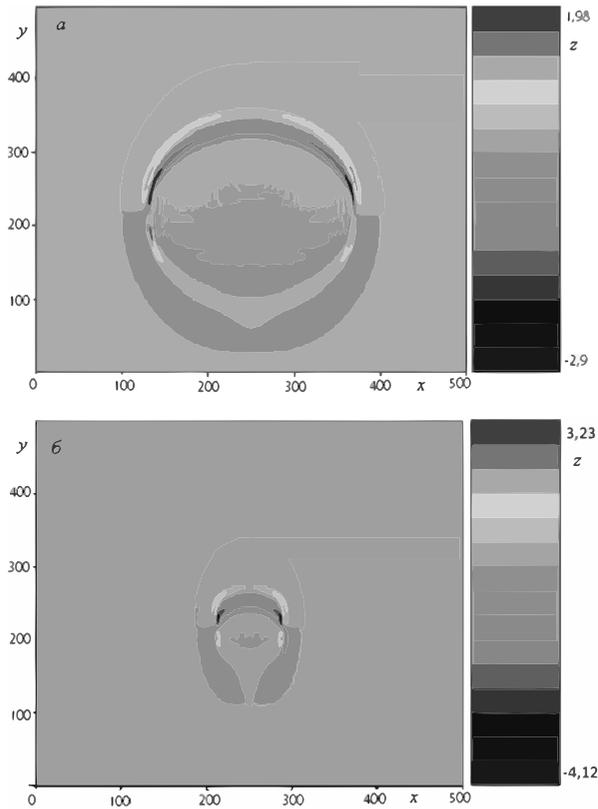


Рис. 1: Эволюция двумерного предельно короткого оптического импульса в системе углеродных нанотрубок под действием внешнего магнитного поля. На осях  $x, y$  отложены относительные единицы расстояния. Яркость соответствует величине электрического поля импульса в относительных единицах (относительная единица составляет  $10^7$  В/м). А)  $T = 18 \times 10^{-1}$  пс, Б)  $T = 6 \times 10^{-1}$  пс. Тип нанотрубки (13,0),  $v/c = 0.98$ ,  $\Phi_{eff}/\Phi_0 = 3$

На рис. 3 показана эволюция двумерного предельно короткого импульса, время распространения которого в три раза меньше, чем у импульса, представленного на рис. 2.

Как видно из рисунков, трехмерные предельно короткие импульсы, распространяясь в среде углеродных нанотрубок, под действием магнитного поля испытывают изменение пространственной структуры вследствие изменения закона дисперсии, описываемого соотношением (1). Магнитное поле, приложенное перпендикулярно оси углеродной нанотрубки, изменяет закон дисперсии, что соответственно влияет на характер распространения трехмерного предельно короткого импульса и соответственно изменяет его форму.

Из показанных эволюций электромагнитного поля

видно, что при уменьшении времени прохождения импульса по образцу, меняется форма импульса. Импульс становится более локализованным в пространстве, и имеет большую амплитуду по сравнению с более медленным импульсом.

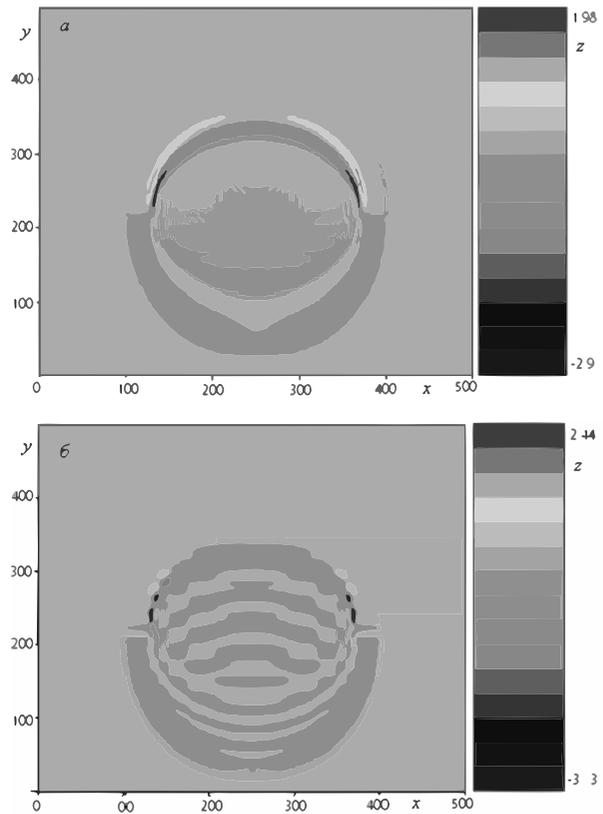


Рис. 2: Эволюция двумерного предельно короткого оптического импульса в системе углеродных нанотрубок под действием внешнего магнитного поля. На осях  $x, y$  отложены относительные единицы расстояния. Яркость соответствует величине электрического поля импульса в относительных единицах (относительная единица составляет  $10^7$  В/м), время распространения импульса  $T = 18 \times 10^{-1}$  пс. А)  $\Phi_{eff}/\Phi_0 = 3$ , Б)  $\Phi_{eff}/\Phi_0 = 0.3$ . Тип нанотрубки (13,0),  $v/c = 0.98$

Из представленных зависимостей можно сделать вывод о том, что все основные эффекты, возникающие вследствие введения внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно оси углеродных нанотрубок, связаны с тем, что изменился закон дисперсии электронов, который определяет иной характер распространения двумерного импульса. Также, обнаружено, что изменяя длительность двумерного предельно короткого оптического импульса, распространяющегося в среде, состоящей из углеродных нанотрубок, возможно менять его амплитуду.

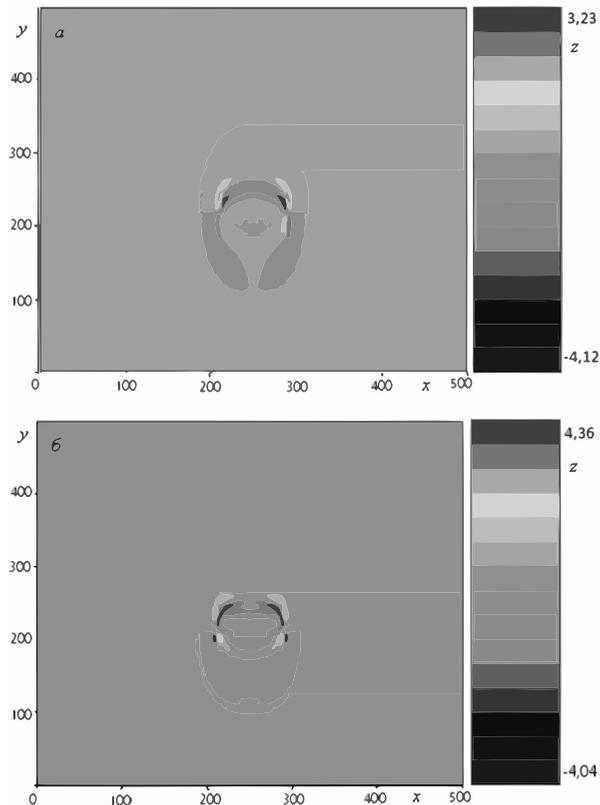


Рис. 3: Эволюция двумерного предельно короткого оптического импульса в системе углеродных нанотрубок под действием внешнего магнитного поля. На осях  $x$ ,  $y$  отложены относительные единицы расстояния, Яркость соответствует величине электрического поля импульса в относительных единицах (относительная единица составляет  $10^7$  В/м), время распространения импульса  $T = 6 \times 10^{-1}$  пс. А)  $\Phi_{eff}/\Phi_0 = 3$ , Б)  $\Phi_{eff}/\Phi_0 = 0.3$ . Тип нанотрубки (13,0),  $v/c = 0.98$

- [1] *Harris P.J.F.* Carbon Nanotubes and Related Structures: New Materials for the Twenty-First Century. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [2] *Галкина Е. Н., Белоненко М. Б.* Изв. РАН. Серия Физическая. **75**, №12. С. 1730. (2011).

- [3] *Белоненко М. Б., Галкина Е. Н., Филимонова З. А.* Оптика и спектроскопия. **120**, №3. С. 100. (2016).
- [4] *Овчинников А. А., Отражев В. В.* ФТТ. **40**, №10. С. 1950. (1998).

## Two-dimensional few cycle optical pulses in the presence of a constant magnetic field

**E. N. Galkina<sup>1,2,a</sup>, M. B. Belonenko<sup>2,3,b</sup>**

<sup>1</sup>*Department of Mathematics and Informatics, Volgograd State Medical University. Volgograd 400131, Russia*

<sup>2</sup>*Department of Informatics and Mathematics, Volgograd Institute of Business. Volgograd 400010, Russia*

<sup>3</sup>*Department of Forensic Expertise and Physics of Materials, Volgograd State University. Volgograd 400062, Russia*

E-mail: <sup>a</sup>*galkina@mail.com*, <sup>b</sup>*mbelonenko@yandex.ru*.

Behavioral features of two-dimensional few cycle optical pulses propagating in array of carbon nanotubes in the presence of external constant magnetic field, applied perpendicular to the axis of nanotubes, are analyzed and presented.

PACS: 72.20.Ht, 42.65.Re.

Keywords: two-dimensional few cycle pulse, magnetic field, carbon nanotubes.

### Сведения об авторах

1. Галкина Елена Николаевна — канд. физ.-мат. наук; тел.: (442) 38-57-03, e-mail: *galkina@mail.com*.

2. Белоненко Михаил Борисович — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (442) 22-41-60, e-mail: *mbelonenko@yandex.ru*.