

ПАРАМЕТР ПОРЯДКА И ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИМПУЛЬСА В УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ В УСЛОВИЯХ НАКАЧКИ

Н.Н. Конобеева, В.В. Бумагин, М.Б. Белоненко

Волгоградский государственный университет, Волгоград
yana_nn@volsu.ru

В работе проводится физико-математическое моделирование динамики трехмерного предельно короткого оптического импульса в среде, испытывающей фазовый переход, и содержащей углеродные нанотрубки. Параметр порядка рассматривается в двух моделях: скалярной и векторной. Проведено сравнение их влияния на распространение импульса в условиях накачки внешней электромагнитной волной.

Ключевые слова: параметр порядка, углеродные нанотрубки, электромагнитный импульс

Общий подход к описанию фазовых переходов, в котором вводится понятие параметра порядка предложен Л.Д. Ландау [1]. Под параметром порядка понимается величина, отличная от нуля при температуре меньше критической, и стремящаяся к нулю при температуре, превышающей критическую. Как известно, параметр порядка – это величина, которая характеризует наличие в материальной среде упорядочения, возникающего при определенных физических условиях. В анизотропном случае параметр порядка может быть векторным, а также многокомпонентным и, вообще говоря, пространственно-неоднородным. В качестве параметра порядка в зависимости от среды могут выступать следующие величины: спонтанная намагниченность (векторный параметр порядка) - у ферромагнетика, волновая функция куперовских пар (комплексный параметр порядка) - у сверхпроводника. Основным параметром порядка, используемым для характеристики сегнетоэлектрических свойств, это спонтанная поляризация. Она и будет выбрана в качестве параметра, характеризующего фазовый переход в данной работе.

Целью настоящего исследования является изучение возможности использования электромагнитных импульсов для определения параметра порядка, как скалярного, так и векторного, в средах с углеродными нанотрубками [2]. При этом важно обеспечить стабильное распространение импульсов, что может быть достигнуто путем введения в систему накачки внешним полем [3], которая выбирается в следующем виде:

$$\Gamma(r) = Q_{\Gamma} \cdot \exp\left(-\frac{r^6}{l_{\Gamma}^6}\right), \quad (1)$$

здесь l_{Γ} - ширина усиливающей среды в перпендикулярном распространению поля направлению, Q_{Γ} - амплитуда усиливающего поля, r - поперечная координата ($r = \sqrt{x^2 + y^2}$).

Амплитуда усиления выбиралась согласно результатам ранее проведенных расчетов без учета параметра порядка [3].

Динамика импульса описывается с помощью уравнений Максвелла, дополненных уравнением движения на параметр порядка [4]. При этом плотность функционала свободной энергии Φ выбирается в стандартном виде:

$$\Phi = \Phi_0 + a \cdot \mathbf{P}^2 + b \cdot \mathbf{P}^4 - \mathbf{E} \cdot \mathbf{P}, \quad (2)$$

где \mathbf{E} - вектор напряженности электрического поля, \mathbf{P} - параметр порядка, который в общем случае может быть и векторным, a и b - коэффициенты разложения Φ по степеням P .

Отметим, что в работе мы используем переход к цилиндрической системе координат, а также учитываем симметричность поля импульса относительно оси z [5]. Поэтому производная по углу не рассматривается.

Эволюция предельно короткого оптического импульса в среде с полупроводниковыми углеродными нанотрубками для двух моделей параметра порядка представлена на рис. 1.

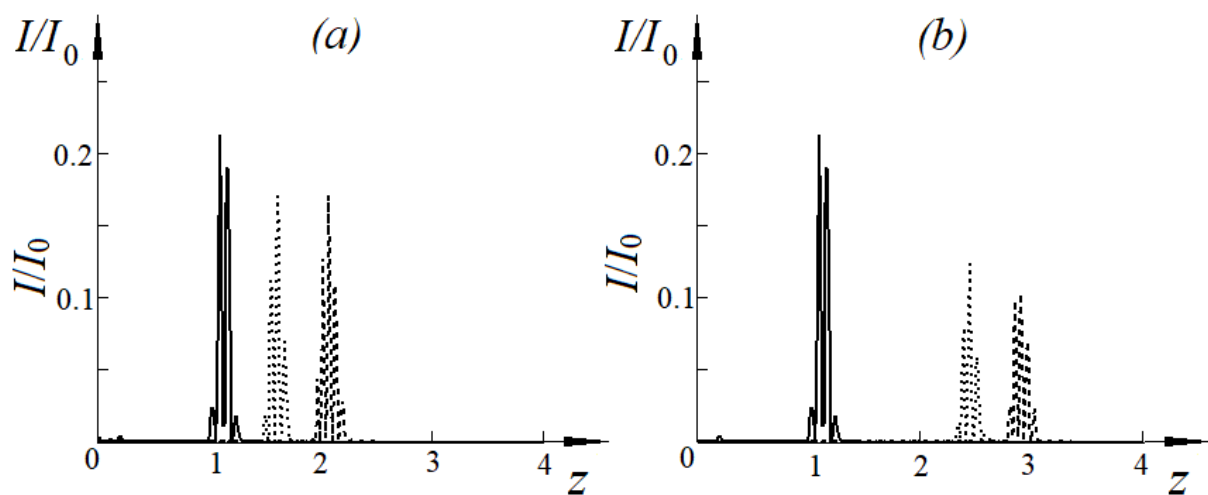


Рис. 1. Эволюция интенсивности электрического поля импульса от продольной координаты ($r=0$): (a) скалярный параметр порядка; (b) векторный параметр порядка. Сплошная кривая соответствует $t=3$ ед., точечная - $t=6$ ед., пунктирная - $t=9$ ед. I_0 - максимум интенсивности при $t=0$. Единица по оси z соответствует 10^{-5} м.

Влияние типа параметра порядка (скалярный или векторный) на форму предельно короткого оптического импульса показана на рис. 2.

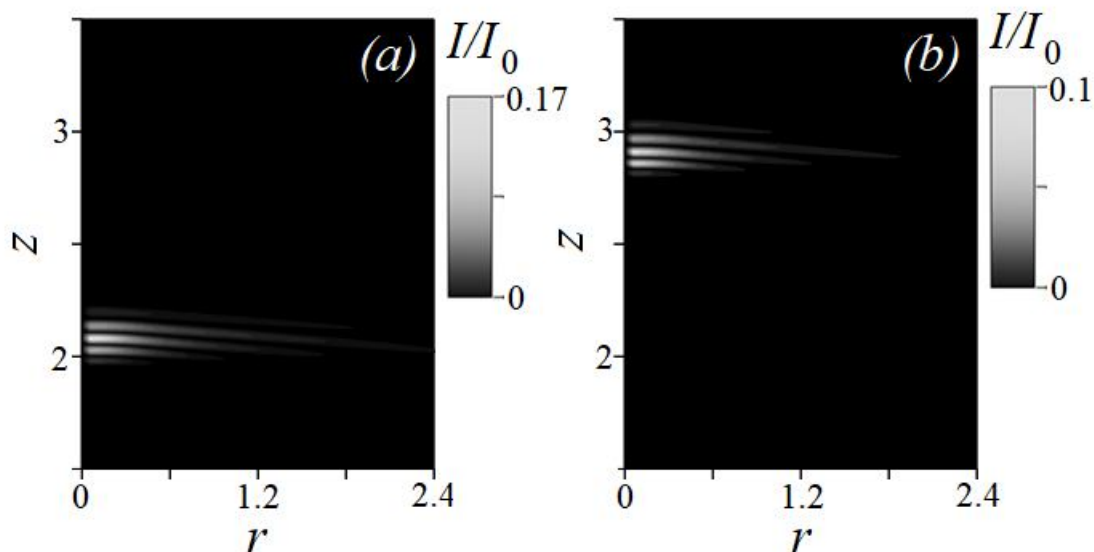


Рис. 2. Зависимость интенсивности электрического поля импульса от координат при $t=9$ ед.: (a) скалярный параметр порядка; (b) векторный параметр порядка. I_0 – максимум интенсивности при $t=0$. Единицы по осям r и z соответствуют 10^{-5} м.

Рисунки 1 и 2 позволяют заключить, что в случае скалярного параметра порядка импульс распространяется с сохранением своей амплитуды. Для векторного же – интенсивность импульса с течением времени падает. При этом мы отмечаем, что в среде со скалярным параметром порядка импульс распространяется медленнее, чем с векторным.

Проведенное исследование показало, что энергетические и пространственные характеристики электромагнитного импульса позволяют определить тип и величину параметра порядка.

Конобеева Н.Н. и Белоненко М.Б. выражают благодарность Министерству науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания за поддержку численного моделирования (проект № 0633-2020-0003).

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Физматлит, 2002. 616 с.
2. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки, Успехи физических наук. 1997, Т. 167, № 9, С. 945–972.
3. Konobeeva N.N., Fedorov E.G., Rosanov N.N., Zhukov A.V., Bouffanais R., Belonenko M.B. Stabilization of ultrashort pulses by external pumping in an array of carbon nanotubes subject to piezoelectric effects. Journal of Applied Physics. 2019. V. 126. P. 203103.
4. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 381 с.
5. Zhukov A.V., Bouffanais R., Fedorov E.G., Belonenko M.B. Three-dimensional electromagnetic breathers in carbon nanotubes with the field inhomogeneity along their axes. J Journal of Applied Physics. 2013. V. 114. P. 143106.

AN ORDER PARAMETER AND DYNAMICS OF ELECTROMAGNETIC PULSES IN CARBON NANOTUBES UNDER PUMP CONDITIONS

N.N. Konobeeva, V.V. Bumagin, M.B. Belonenko

Volgograd State University, Volgograd
yana_nn@volsu.ru

In this work, physical and mathematical modeling of the dynamics of a three-dimensional extremely short optical pulse in a medium undergoing a phase transition and containing carbon nanotubes is carried out. The order parameter is considered in two models: scalar and vector. Their effect on pulse propagation under conditions of pumping by an external electromagnetic wave is compared.

Keywords: order parameter, carbon nanotubes, electromagnetic pulse