

Влияние векторного параметра порядка на эволюцию электромагнитных импульсов в оптически анизотропной среде с углеродными нанотрубками

С.В. Белибин
Волгоградский государственный
университет
Волгоград, Россия
belibihin@gmail.com

А.С. Кульбина
Волгоградский государственный
университет
Волгоград, Россия
kylbinaa@gmail.com

Н.Н. Конобеева
Волгоградский государственный
университет
Волгоград, Россия
yana_nn@volsu.ru

М.Б. Белоненко
Волгоградский государственный
университет
Волгоград, Россия
mbelonenko@yandex.ru

Аннотация—В данной работе изучено влияние векторного параметра порядка оптически анизотропной среде с углеродными нанотрубками на трехмерный предельно короткий электромагнитный импульс, распространяющийся в данной среде. Исследована динамика импульсов в зависимости от скорости релаксации параметра порядка.

Ключевые слова— углеродные нанотрубки, электромагнитный импульс, оптическая анизотропия.

1. ВВЕДЕНИЕ

Понятие параметра порядка возникает при описании фазовых переходов [1]. В качестве параметра порядка в зависимости от среды могут выступать следующие величины: намагниченность в ферромагнетике, вектор поляризации в сегнетоэлектрике и т.д.

Ранее нами был предложен способ определения величины параметра порядка с помощью предельно короткого импульса, как в скалярном [2], так и векторном случаях [3]. При этом речь шла об анизотропной среде. В данной работе мы будем исследовать влияние параметра порядка на динамику электромагнитного импульса при его распространении в оптически анизотропной среде с углеродными нанотрубками (УНТ). Введение в среду УНТ объясняется их уникальными свойствами [4], и в первую очередь в контексте настоящей задачи их стабилизирующим действием на электромагнитный импульс.

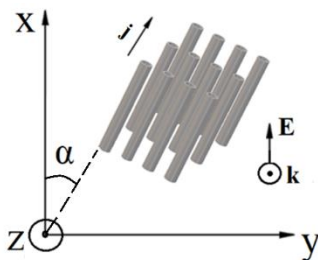


Рис. 1. Геометрия задачи

2. МОДЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве объекта исследования выберем диэлектрическую анизотропную среду, в которую помещены углеродные нанотрубки. Геометрия задачи представлена на рис. 1.

Можно записать уравнения движения используя феноменологический подход, развитый в [1, 5]:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = -\Gamma \frac{\delta\Phi}{\delta\mathbf{P}}, \quad (1)$$

где Γ – кинетический коэффициент (далее положен равным 1, что дает выбор масштаба времени), \mathbf{P} – параметр порядка, Φ – плотность функционала свободной энергии.

Далее будем считать, что векторный параметр порядка связан с электрическим полем, векторный потенциал которого имеет вид $\mathbf{A}=(A_x(x,y,z,t), A_y(x,y,z,t), 0)$.

Выберем Φ в стандартном виде с учетом влияния внешнего поля $\mathbf{E}=(E_x(x,y,z,t), E_y(x,y,z,t), 0)$:

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

здесь a, b – коэффициенты разложения Φ по степеням \mathbf{P} , также примем во внимание, что кроме электромагнитного поля импульса электроны углеродных нанотрубок испытывают воздействие поля самой среды $\mathbf{E}^s = \delta\Phi/\delta\mathbf{P}$.

Используя переход к цилиндрической системе координат, а также учитывая калибровку: $\mathbf{E} = -c^{-1} \partial \mathbf{A} / \partial t$, $\mathbf{E}^s = -c^{-1} \partial \mathbf{A}^s / \partial t$ запишем трехмерное волновое уравнение на две компоненты векторного потенциала:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_o^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_x}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial \phi^2} + \frac{4\pi}{c} j_x(A_x, A_x^s) \\ \frac{1}{v_e^2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_y}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial \phi^2} + \frac{4\pi}{c} j_y(A_y, A_y^s), \end{aligned} \quad (3)$$

$$v_o = c/n_x, \quad v_e = c/n_y$$

r, z, ϕ – координаты в цилиндрической системе, n_x, n_y – показатели преломления в направлении x и y

соответственно, c – скорость света. Плотность тока $\mathbf{j} = (j_x, j_y)$ определяется через закон дисперсии углеродных нанотрубок [6].

Система уравнений (3) решалась с использованием численного моделирования [7]. Начальное условие для электрического поля импульса выбиралось в виде Гаусса:

$$\begin{aligned} A_x &= Q \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{l_z^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{l_r^2}\right), \\ \frac{d}{dt} A_x &= \frac{2v_0 Q}{l_z^2} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{l_z^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{l_r^2}\right) \\ A_y &= 0, \frac{d}{dt} A_y = 0, \Phi(r, z, 0) = \sqrt{\frac{2a}{b}}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \operatorname{tg} \varphi = \frac{y}{x}$$

где Q – амплитуда импульса в начальный момент времени, l_z, l_r – определяют ширину импульса, v_0 – начальная скорость импульса вдоль направления z .

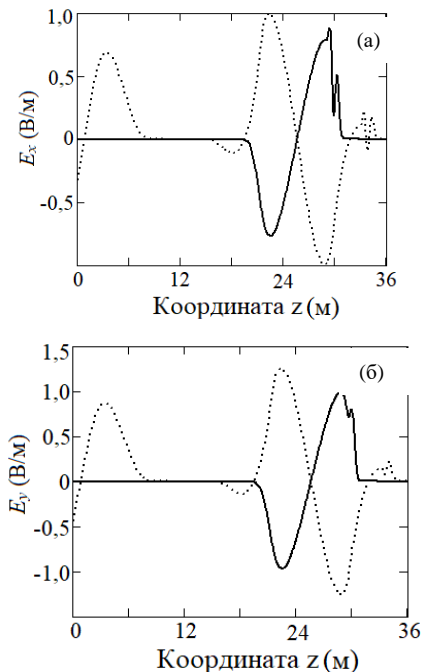


Рис. 2. Зависимость компонент напряженности электрического поля от координаты z в момент времени $t = 9$ ($a = 0,1, b = -1, \Gamma = 0,01$): Рис. (а) для компоненты E_x ; (б) для компоненты E_y . Сплошная линия – без учета параметра порядка, пунктирная линия – с параметром порядка. Единица по оси z соответствует 10^{-5} м, по оси E – 10^7 В/м

Влияние параметра порядка на форму импульса (на обе компоненты электрического поля) показано на рис. 2.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования построена модель, описывающая динамику векторного параметра порядка оптически анизотропной среды с углеродными нанотрубками в присутствии электромагнитного импульса. Также изучена зависимость величины параметра порядка от скорости релаксации Γ . Показано, что скорость релаксации выступает в роли ключевого параметра, определяющего поляризацию оптически анизотропной среды с УНТ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Совета по грантам Президента РФ, грант № МД-3173.2021.1.2.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ландау, Л.Д. Статистическая физика. Часть 1. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2002. – 616 с.
- [2] Zhukov, A.V. Influence of the order parameter on the dynamics of ultrashort pulses in an environment with carbon nanotubes / A.V. Zhukov, R. Bouffanais, N.N. Konobeeva, M.B. Belonenko // Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 121. – P. 084301.
- [3] Konobeeva, N.N. Influence of the vector order parameter on the dynamics of 3D ultrashort pulses in carbon nanotubes / N.N. Konobeeva, M.B. Belonenko // J. Nano- Electron. Phys. – 2020. – Vol. 12(4). – P. 04016.
- [4] Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon / S. Iijima // Nature. – 1991. – Vol. 354(6348). – P. 56-58.
- [5] Паташинский, А.З. Флуктуационная теория фазовых переходов / А.З. Паташинский, В.Л. Покровский. – М.: Наука, 1982. – 380 с.
- [6] Zhukov, A.V. Three-dimensional electromagnetic breathers in carbon nanotubes with the field inhomogeneity along their axes / A.V. Zhukov, R. Bouffanais, E.G. Fedorov, M.B. Belonenko // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol. 114(4). – P. 143106.
- [7] Thomas, J.W. Numerical partial differential equations – Finite difference methods / J.W. Thomas. – New York: Springer-Verlag, 1995. – 426 p.