

Предельно короткие оптические импульсы в оптически анизотропной среде с углеродными нанотрубками в присутствии механической нагрузки

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

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

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

Аннотация—В данной работе мы исследуем влияние акустического поля на динамику предельно короткого импульса в массиве углеродных нанотрубок, помещенных в оптически анизотропную среду. Акустическое поле вводится в рамках калибровочной теории. Выявлено влияние величины данного поля на характер распространения импульса в среде.

Ключевые слова— предельно короткий импульс, анизотропия, механическое напряжение.

1. ВВЕДЕНИЕ

Широко известно, что предельно короткие оптические импульсы длительностью в несколько фемтосекунд являются предметом пристального внимания исследователей в области нелинейной оптики на протяжении последних двух десятилетий [1, 2] благодаря большому количеству практических приложений.

Важным вопросом при изучении особенностей эволюции предельно коротких импульсов является выбор среды, в которой импульс распространялся бы стабильно. С этой точки зрения отличным кандидатом становятся углеродные нанотрубки (УНТ) [3], хорошо зарекомендовавшие себя в этом вопросе. В качестве анизотропной среды выступает диэлектрический кристалл с включенными в него углеродными нанотрубками (УНТ) [4]. При этом необходимо учитывать свойства самой среды, в которую включаются УНТ. В данной работе мы рассматриваем оптически анизотропную среду. В этом случае мы должны учитывать, как вторую поляризацию поля, так и разные значения скорости вдоль разных оптических осей диэлектрического кристалла [5].

В тоже время отметим, что не менее важным вопросом является изучение динамики импульса в среде под действием сильных внешних полей. Авторами рассмотрено влияние внешних деформаций в одномерном случае и двумерном случаях [6, 7]. В настоящей работе мы не только построим модель для трехмерного случая, но и обобщим ее на случай оптически анизотропной среды.

2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Прежде чем перейти к записи уравнений опишем рассматриваемую нами систему. В диэлектрический кристалл с осями, сонаправленными координатным осям ОХ, ОУ и ОZ, помещен массив углеродных нанотрубок

под углом α к оси ОХ. Взаимодействием между электронами УНТ пренебрегаем в силу больших расстояний между трубками (превышающих диаметр самих УНТ).

Система уравнений, описывающих распространение предельно короткого оптического импульса в анизотропной среде, при переходе к цилиндрической системе координат и с учетом отсутствия накопления заряда вдоль оси УНТ [8] имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{1}{V_x^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_x}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} + \frac{4\pi}{c} j_x(A_x); \\ \frac{1}{V_y^2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_y}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} + \frac{4\pi}{c} j_y(A_y), \end{cases} \quad (1)$$

здесь A_x, A_y – ненулевые компоненты векторного потенциала электрического поля импульса, $j=(j_x, j_y, 0)$ – плотность электрического тока, V_x, V_y – скорости импульса вдоль направлений x и y соответственно.

Акустическое поле учитывается с помощью калибровочной теории, и в конечном счете приводит к появлению поля напряжений A' [9], которое дает поправку к полю импульса:

$$A' = a \cdot u, \quad (2)$$

где a – коэффициент пропорциональности, зависящий от электронного параметра Грюнайна [10], коэффициента Пуассона и невозмущенного интеграла перескока электронов в УНТ, u – деформационное поле.

Таким образом, систему уравнений (1) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} A_x + \beta \cos \alpha \sum_{q=1}^{\infty} b_q \sin \left(\frac{aq(eA_x \cos \alpha + eA_y \sin \alpha + A')}{c} \right) = 0; \\ A_y + \beta \sin \alpha \sum_{q=1}^{\infty} b_q \sin \left(\frac{aq(eA_x \cos \alpha + eA_y \sin \alpha + A')}{c} \right) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}, \\ b_q &= \sum_S a_{sq} \int dp_z \cdot \cos(pq) F(p, s) = 0, \\ \beta &= 4\pi e n_0 \gamma a / c, \end{aligned} \quad (4)$$

где $F(p, s)$ – функция распределения Ферми, a_{sq} – коэффициенты разложения закона дисперсии электронов УНТ в ряд Фурье, n_0 – концентрация электронов в УНТ, e – заряд электрона, a – длина связи С-С в УНТ, p –

компонента квазимпульса электрона проводимости вдоль оси нанотрубки, $s = 1, \dots, m$, тип УНТ ($m, 0$).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Далее было проведено численное решение полученной системы уравнений при помощи явной конечно-разностной схемы при следующих параметрах системы: углеродные нанотрубки полупроводникового типа (13, 0), коэффициенты b_q , вычислялись при температуре $T = 293$ К [11], $V_x/V_y = 2$. Шаги разностной схемы уменьшались последовательно в 2 раза, пока решение не изменялось в 6-м значащем знаке. Отношение шага по времени к шагу по координате составляет 1/3, что отвечает условию устойчивости.

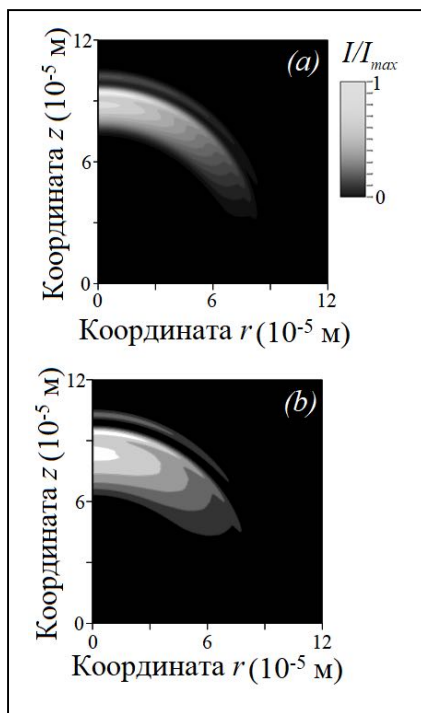


Рис. 1. Зависимость интенсивности электрического поля импульса для компоненты E_x от координат r и z для разных значений акустического поля: (a) $u = 0,05$; (b) $u = 0,1$. I_{max} – максимальное значения интенсивности для случаев (a) и (b)

Влияние акустического поля представлено на рис. 1. Здесь мы приводим зависимость интенсивности поля импульса для компоненты, направленной вдоль оси ОХ. Видно, что увеличение акустического поля в 2 раза приводит к расплыванию импульса ($\approx 30\%$) в продольном направлении.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сделаем основные выводы из проведенного исследования. Показано, что акустическое поле

оказывает существенное влияние на динамику предельно короткого оптического импульса при его распространении в оптически анизотропном кристалле с массивом углеродных нанотрубок. Выявлено, что величина механической нагрузки позволяет управлять продольной шириной импульса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Н.Н. Конобеева и А.С. Кульбина благодарят за поддержку исследования Министерство науки и высшего образования РФ, Совет по грантам Президента РФ, грант № МД-3173.2021.1.2.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Andrianov, A.V. High-energy femtosecond pulse shaping, compression, and contrast enhancement using multicore fiber / A.V. Andrianov, N.A. Kalinin, M.Yu. Koptev, O.N. Egorova, A.V. Kim, A.G. Litvak // *Optics Letters*. – 2020. – V. 44(2). – P. 303-306. DOI: 10.1364/OL.44.000303.
- [2] Kozlov, S.A. Fundamentals of femtosecond optics / S.A. Kozlov V.V. Samartsev. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. – 273 p.
- [3] Елецкий, А.В. Углеродные нанотрубки / А.В. Елецкий // *УФН*. – 1997. – Т. 167, № 9. – С. 945-972. DOI: 10.3367/UFN.0167.199709b.0945.
- [4] Li, D. Wavelength and pulse duration tunable ultrafast fiber laser modelocked with carbon nanotubes / D. Li, H. Jussila, Y. Wang, G. Hu, T. Albrow-Owen, R.C.T. Howe, Z. Ren, J. Bai, T. Hasan, Z. Sun. // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – P. 2738. DOI: 10.1038/s41598-018-21108-3.
- [5] Матвеев, А.Н. Оптика / А.Н. Матвеев. – М. Высшая школа. – 1985. – 351 с.
- [6] Ляпкосова, О.С. Предельно короткие оптические импульсы в деформированном графене в рамках калибровочной теории / О.С. Ляпкосова, Н.Г. Лебедев, М.Б. Белоненко // *Физика твердого тела*. – 2013. – Т. 55, № 12. – С. 2474-2478.
- [7] Konobeeva, N.N. Modeling of two-dimensional light bullets propagation in an array of carbon nanotubes taking into account the mechanical tension and magnetic field / N.N. Konobeeva, D.S. Skvortsov // *Mathematical Physics and Computer Simulation*. – 2020. – Vol. 23(3). – P. 36-43. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.4.
- [8] 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 // *J. Appl. Phys.* – 2013. – Vol. 114. – P. 143106. DOI: 10.1063/1.4824370.
- [9] Vozmediano, M.A.H. Gauge fields in graphene / M.A.H. Vozmediano, M.I. Katsnelson, F. Guinea // *Physics Reports*. – 2010. – Vol. 496. – P. 109-148. DOI: 10.1016/j.physrep.2010.07.003.
- [10] Sanditov, D.S. On the Grüneisen parameter for crystals and glasses / D.S. Sanditov, V.V. Mantatov, M.V. Darmaev, B.D. Sanditov // *Technical Physics*. – 2009. – Vol. 54. – P. 385-388. DOI: 10.1134/S1063784209030098.
- [11] Zhukov, A.V. Collisions of three-dimensional bipolar optical solitons in an array of carbon nanotubes / A.V. Zhukov, R. Bouffanais, B.A. Malomed, H. Leblond, D. Mihalache, E.G. Fedorov, N.N. Rosanov, M.B. Belonenko // *Phys. Rev. A*. – 2016. – Vol. 94. – P. 053823. DOI: 10.1103/PhysRevA.94.053823.