

Предельно короткие оптические импульсы в оптически анизотропном фотонном кристалле в условиях оптического резонатора

Ю.В. Двужилова
Волгоградский Государственный
Университет
Волгоград, Россия
dvuzhilov.ilya@volsu.ru

И.С. Двужилов
Волгоградский Государственный
Университет
Волгоград, Россия
dvuzhilov.ilya@volsu.ru

Н.Н. Конобеева
Волгоградский Государственный
Университет
Волгоград, Россия
yana_nn@volsu.ru

М.Б. Белоненко
Волгоградский Государственный
Университет
Волгоград, Россия
belonenko.mikhail@volsu.ru

Аннотация—В работе представлено теоретическое и численное исследование эволюции трехмерных предельно коротких оптических импульсов фемтосекундной длительности в оптически анизотропном фотонном кристалле на основе углеродных нанотрубок типа «зиг-заг». Система помещена в условия оптического резонатора. Расчеты проводились на больших временах до 100 пс. Продемонстрировано устойчивое распространение импульсов в такой среде. Показано, что в таких условиях возможно возникновение резонаторных солитонов.

Ключевые слова— световые пули, анизотропный фотонный кристалл, углеродные нанотрубки, оптический резонатор.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современный прогресс в нелинейной оптике и фотонике обусловлен развитием элементной базы, позволившей создавать структуры, в том числе периодические, масштабы которых сравнимы или даже много меньше длины волны света [1].

Фотонные кристаллы предоставляют огромные возможности управления световым импульсом, проходящим сквозь него, а использование электрооптических компонент позволяет управлять распространением и поляризацией света с помощью внешних полей. В перспективе такие кристаллы могут стать ключевым элементом быстрых оптических и оптоэлектронных устройств. Кроме того, экспериментально показано, что в резонаторе на основе фотонных кристаллов может быть существенно увеличен магнитооптический отклик [2]. Переменность показателя преломления фотонного кристалла обеспечивает идеальную нелинейную среду для распространения и исследования электромагнитных солитонов, предельно коротких оптических импульсов или световых пульс.

Под предельно короткими оптическими импульсами (ПКОИ) мы понимаем импульсы фемтосекундной длительности, которые содержат малое число периодов колебания электрического поля. Энергия таких импульсов остается локализованной в ограниченной области пространства, а также они обладают высокой направленностью их излучения, стабильностью формы и устойчивостью к возмущениям.

Материалом для оптически анизотропного фотонного кристалла могут служить полупроводниковые углеродные нанотрубки (УНТ). Их закон дисперсии для электронов непараболический и это обуславливают нелинейность отклика нанотрубок на воздействие электромагнитных умеренных напряженностей, уже начиная со значений $10^3 - 10^4$ В/см [3]. Отметим, что среда углеродных нанотрубок помещена в условия оптического резонатора. Рассматриваемый цилиндрический резонатор, является идеальным проводником, т.е. отсутствуют свободные заряды, электрическое поле на границе равно нулю.

Интересной задачей является учет оптически анизотропных свойств среды и управление распространением импульса в ней. Учет анизотропии среды может приводить к различным эффектам, например, резонансу Захарова–Бенни [4].

2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Исследуемая задача имеет следующую геометрию: направление распространения предельно короткого оптического импульса и направление пространственной модуляции показателя преломления оптически анизотропного фотонного кристалла совпадают с осью OZ. Ось углеродных нанотрубок образует угол α с приложенным электрическим полем и током.

Время релаксации для электронов в углеродных нанотрубках составляет примерно $3 \cdot 10^{-13}$ с [5], а характерные времена для задач динамики предельно короткого оптического импульса (порядка 10^{-14} с.), следовательно, ансамбль электронов в УНТ можно описывать при помощи бесстолкновительного кинетического уравнения Больцмана:

$$\frac{\partial f}{\partial t} - \frac{q}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial p} = 0, \quad (1)$$

где f - функция распределения, которая в начальный момент времени совпадает равновесной функцией распределения Ферми, $\mathbf{A} = (A_x(x, y, z, t), A_y(x, y, z, t), 0)$ - вектор-потенциал электрического поля импульса.

Эффектом накопления заряда можно пренебречь, таким образом, можно считать, что цилиндрическая

симметрия в распределении поля сохраняется. С учетом сказанного выше, уравнение на компоненты вектор-потенциала в цилиндрической системе координат примет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_x}{\partial r} \right) - \frac{n^2(z)}{v_0^2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} + \\ & + \frac{4en_0\gamma_0 a \cdot \cos \alpha}{c} \sum_{q=1} b_q \cos \left(\frac{aeq(A_x \cos \alpha + A_y \sin \alpha)}{c} \right) = 0, \\ & \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_y}{\partial r} \right) - \frac{n^2(z)}{v_e^2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} + \\ & + \frac{4en_0\gamma_0 a \cdot \sin \alpha}{c} \sum_{q=1} b_q \cos \left(\frac{aeq(A_x \cos \alpha + A_y \sin \alpha)}{c} \right) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

здесь $n(z)$ – пространственно модулированный показатель преломления среды, который задает оптически анизотропный фотонный кристалл; c – скорость света; e – заряд электрона; a – постоянная решетки углеродной нанотрубки; n_0 – концентрация электронов; b_q – коэффициенты разложения закона дисперсии электронов в УНТ в ряд Фурье. Начальные условия на вектор-потенциал соответствуют гауссовому профилю импульса для одного колебания электрического поля.

Исследуемое уравнение (2) было решено численно с помощью явной разностной схемы типа «крест» [6].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Из рис. 1 следует, что импульс распространяется устойчиво вдоль оси цилиндрического резонатора. Импульс отражается от стенок резонатора, при этом его энергия остается локализованной в ограниченной области пространства. Отметим, устойчивость локализации энергии импульса на больших временах до 90 пс.

Значение амплитуды импульса меняется незначительно, а изменение формы импульса, связано как с поперечной структурой импульса (возбуждаются внутренние колебательные моды импульса), так и с тем, что среда неоднородна (показатель преломления среды имеет пространственную модуляцию [7]). Таким образом, гауссова форма уже не сохраняется полностью. Однако, локализация энергии происходит за счет многократного отражения волн от стенок резонатора и последующей интерференции.

При анализе Фурье-спектров выявлено, что сначала происходит обогащения спектра из-за взаимодействия со средой анизотропного фотонного кристалла, а в дальнейшем происходит эффективная генерация высших гармоник.

БЛАГОДАРНОСТИ

Двужилова Ю.В., Двужилон И.С., Конобеева Н.Н. выражают благодарность Министерству науки и высшего образования РФ в рамках Гранта Президента (Грант №

МД-3173.2021.1.2 (соглашение 075-15-2021-337 от 20.04.2021)).

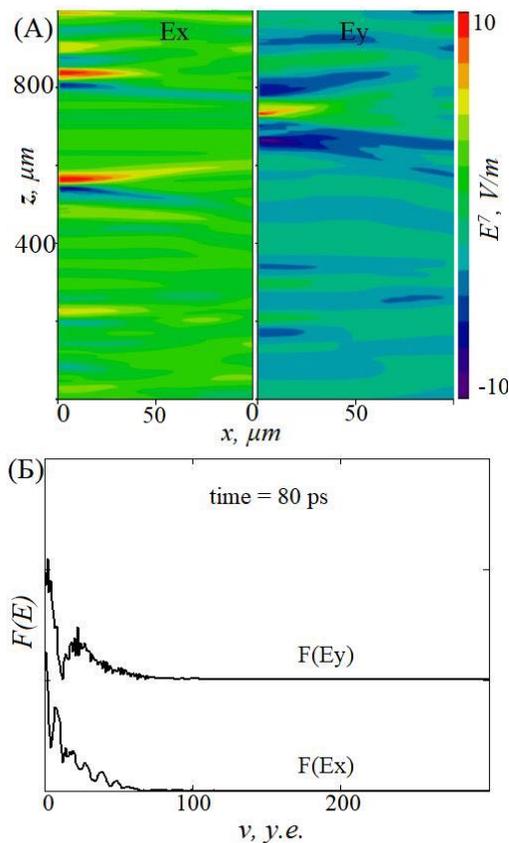


Рис. 1. (А) Картина двух компонент напряженности импульса в момент времени 80 пс; (Б) Фурье-спектры напряженности импульса в анизотропном фотонном кристалле в условиях резонатора

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sheng, P. Introduction to Wave Scattering, Localization and Mesoscopic Phenomena / P. Sheng. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 333 p.
- [2] Inoue, M. Magnetophotonic Crystals: Now and Future / M. Inoue, H. Uchida, P.B. Lim, A.V. Baryshev, A.V. Khanikaev // Advances in Science and Technology. – 2006. – Vol. 45. – P. 2588.
- [3] Dresselhaus, M.S. Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes / M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P.C. Eklund. – San Diego: Academic Press, 1996. – 965 p.
- [4] Sazonov, S.V. Continuous Stokes self-scattering of an optical pulse in a uniaxial crystal in the case of Zakharov—Benney resonance / S.V. Sazonov, A.F. Sobolevskii // Quantum Electronics. – 2005. – Vol. 35(11). – P. 1019-1026.
- [5] Ландау, Л.Д. Физическая кинетика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – Москва: Физматлит, 1979. – 275 с.
- [6] Бахвалов, Н.С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения). – Москва: Наука, 1975. – 632 с.
- [7] Dvuzhilov, I.S. Ultrashort Optical Pulses in Photon Crystals of Carbon Nanotubes under Action of an External Pump Field / I.S. Dvuzhilov, Y.V. Dvuzhilova, M.B. Belonenko // Optics and Spectroscopy. – 2021. – Vol. 129(1). – P. 127-134.