

**Влияние оптической анизотропии на распространение предельно коротких импульсов в полимерном композите с углеродными нанотрубками**

С.В. Белибихин, Н.Н. Конобеева

*уапа\_nn@volsu.ru*

*ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»*

*400062, Россия, Волгоград, Университетский проспект, 100*

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.026

**Аннотация:** В данной работе исследуется эволюция электромагнитных волн в оптически анизотропной среде с углеродными нанотрубками и полимерами. Актуальность работы обусловлена активным использованием подобных нанокомпозитов в современной нанофотонике и оптоэлектронике, где требуется управление световыми импульсами фемтосекундного диапазона. Основное внимание уделено влиянию анизотропии оптических свойств, которая возникает вследствие определенной ориентации углеродных нанотрубок в полимерной матрице. Данное явление существенно модифицирует нелинейный отклик среды. Система волновых уравнений на две компоненты векторного потенциала дополнена слагаемым, учитывающим влияние полимеров на предельно короткий оптический импульс. Установлены зависимости параметров выходного импульса от степени анизотропии и концентрации нанотрубок в композите. Показано, что за счет управления ориентацией углеродных нанотрубок можно целенаправленно влиять на параметры предельно короткого оптического импульса. Это открывает значительные перспективы для проектирования и создания новых активных элементов, таких как сверхбыстрые оптические затворы, модуляторы, ограничители лазерного излучения и сенсоры, основанные на управляемых нелинейных свойствах материала.

*Ключевые слова:* углеродные нанотрубки, полимер, предельно короткие лазерные импульсы, оптическая анизотропия.

*Белибихин Сергей Викторович – аспирант 4 года обучения кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»*

*Конобеева Наталья Николаевна – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры информационных систем и компьютерного моделирования ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»*

*Original paper*

**Influence of optical anisotropy on the extremely short pulses propagation in a polymer composite with carbon nanotubes**

S.V. Belibikhin, N.N. Konobeeva

*Volgograd State University, Volgograd, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.026

**Abstract:** In this paper, we study the evolution of electromagnetic waves in an anisotropic optical medium with carbon nanotubes and polymers. The relevance of the work is due to the active use of such nanocomposites in modern nanophotonics and optoelectronics, where control of femtosecond light pulses is required. The main attention is paid to the influence of anisotropy of optical properties, which occurs due to a certain orientation of carbon nanotubes in a polymer matrix. This phenomenon significantly modifies the nonlinear response of the medium. The system of wave equations for two components for the vector potential is supplemented by a term that takes into account the effect of polymers on an extremely short optical pulse. The dependences of the output pulse parameters on the degree of anisotropy and concentration of nanotubes in the composite are established. It is shown that by controlling the orientation of carbon nanotubes, it is possible to purposefully influence such parameters of an extremely short optical pulse. This opens up significant prospects for the design and creation of new active elements, such as ultrafast optical shutters, modulators, laser radiation limiters and sensors based on controlled nonlinear properties of materials.

*Keywords: carbon nanotubes, polymer, extremely short laser pulses, optical anisotropy.*

*Sergey V. Belibikhin – 4<sup>th</sup> year postgraduate student, Department of Forensic Science and Physical Materials Science, Volgograd State University*

*Natalia N. Konobeeva – Dr. Sc., Docent, Professor of the Department of Information Systems and Computer Modeling, Volgograd State University, ORCID: 0000-0002-6043-9555*

Поступила в редакцию/received: 12.07.2025; после рецензирования/reviced: 12.09.2025; принята/accepted 14.09.2025.

## **1. Введение**

Несмотря на то, что предельно короткие оптические импульсы достаточно давно изучаются и предложено много способов их генерации [1-4], интерес к ним не ослабевает до сих пор [5-7]. Это связано как с практическим применением таких импульсов [8, 9], так и с необходимостью изучения их взаимодействия с различными средами, в том числе и обладающими оптически анизотропными свойствами. В этом случае имеет место эффект двулучепреломления, при котором показатель преломления зависит от направления поляризации. При этом могут наблюдаться интересные эффекты, например, оптическое выпрямление, генерация второй гармоники и др. [10]. В то же время огромный прорыв в физике наноструктур постоянно создает предпосылки для открытия новых объектов для использования с этой точки зрения. Одним из таких объектов являются углеродные нанотрубки (УНТ), свойства которых уже давно интенсивно изучаются и применяются в различных областях, в том числе и в приложениях современной оптоэлектроники [11, 12].

Ранее были выявлены особенности распространения предельно короткого импульса в оптически анизотропной среде с углеродными нанотрубками [13], в том числе проявляющими металлическую проводимость [14], а также при учете примесей [15]. Но вне рассмотрения остался случай распространения импульса в анизотропной среде с композиционным материалом (УНТ с полимерами). Изучение данного вопроса очень важно, поскольку добавление полимеров может внести существенный вклад в изменение свойств среды и, следовательно, повлиять на пространственные и энергетические характеристики распространяющегося импульса. Для того, чтобы в полной мере использовать свойства УНТ необходимо комбинировать их с полимерами, получая при этом дополнительные преимущества [16].

## **2. Основные уравнения**

Рассмотрим композиционный материал, состоящий из полимера с углеродными нанотрубками, погруженный в диэлектрическую анизотропную среду (кристалл). Оси координат сонаправлены осям кристалла, при этом угол наклона УНТ к оси  $Ox$  составляет  $\alpha$  рад. В начальный момент времени электрическое поле  $\vec{E}$  направлено вдоль оси

$OX$ . Оно возбуждает электрический ток в УНТ, что приводит к появлению поля вдоль оси  $OY$ . Вектор потенциал имеет вид:  $\vec{A} = (A_1(x, y, z, t), A_2(x, y, z, t), 0)$ , плотность электрического тока  $\vec{j} = (j_1(x, y, z, t), j_2(x, y, z, t), 0)$ . Для компоненты электрического поля, направленной под углом к оси УНТ, запишем трехмерное волновое уравнение с учетом вклада полимера. В этом случае модель, разработанная ранее, должна быть модифицирована для учета содержания в среде полимеров следующим образом:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial z^2} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}_{CNT}(\vec{A}) + \frac{4\pi}{c} \vec{j}_{POL}(\vec{A}), \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света,  $\vec{j}_{CNT}$  и  $\vec{j}_{POL}$  – вклады в электрический ток углеродных нанотрубок и полимеров соответственно.

Далее перейдем в цилиндрическую систему координат и перепишем уравнение (1) на две компоненты векторного потенциала:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_o^2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial A_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A_1}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial \phi^2} + \frac{4\pi}{c} j_{CNT}(A_1, A_2) + \frac{4\pi}{c} j_{POL}(A_1, A_2), \\ \frac{1}{v_e^2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial A_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A_2}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial \phi^2} + \frac{4\pi}{c} j_{CNT}(A_1, A_2) + \frac{4\pi}{c} j_{POL}(A_1, A_2); \end{aligned} \quad (2)$$

здесь  $(r, z, \phi)$  – координаты в цилиндрической системе,  $v_o$  – скорость обыкновенного луча,  $v_e$  – скорость необыкновенного луча [17].

Для плотности тока вдоль оси углеродных нанотрубок имеем:

$$j = 2e \sum_{s=1}^m \int v_s(p) \cdot F(p, s) dp, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд электрона, интегрирование ведется в границах зоны Бриллюэна,  $p$  – компонента квазиимпульса электрона проводимости вдоль оси нанотрубки,  $v_s(p) = \partial \varepsilon_s(p) / \partial p$  – скорость электронов,  $F(p, s)$  – функция распределения Ферми,  $\varepsilon_s(p)$  – дисперсионное соотношение для  $\pi$ -электронов УНТ и имеет вид [18]:

$$\varepsilon_s(p) = \gamma_0 \sqrt{1 + 4 \cos(ap) \cos\left(\frac{\pi s}{m}\right) + 4 \cos^2\left(\frac{\pi s}{m}\right)}, \quad (4)$$

$s = \overline{1, m}$ ,  $m$  – индекс хиральности УНТ,  $\gamma_0$  – интеграл перескока электрона,  $a = 3b/2\hbar$ ,  $b$  – длина межатомной связи в УНТ.

Согласно работе [19], можно не учитывать неоднородность поля в виду того, что накопленный заряд дает около 1% вклада в ток. Это приводит к сохранению цилиндрической симметрии в распределении поля и позволяет упростить систему уравнений (2):

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial A_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A_1}{\partial z^2} - \frac{1}{v_o^2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{4en_0\gamma_0 a \cdot \cos\alpha}{c} f_1(A_1, A_2) = 0, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial A_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A_2}{\partial z^2} - \frac{1}{v_e^2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{4en_0\gamma_0 a \cdot \sin\alpha}{c} f_1(A_1, A_2) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$f_1(A_1, A_2) = \sum_{q=1}^{\infty} b_q \sin \left( \frac{aeq(A_1 \cos\alpha + A_2 \sin\alpha)}{c} \right) + \chi \cdot \sin \left( \frac{a_{POL} e(A_1 \cos\alpha + A_2 \sin\alpha)}{c} \right);$$

$n_0$  – концентрация электронов в УНТ,  $\chi$  – концентрация электронов в полимере,  $\alpha$  – угол наклона УНТ к оси ОХ,  $a_{POL}$  – длина связи C–C в полимере.

$$b_q = \sum_s a_{sq} \int_{BZ} dp \cdot \cos(pq) \frac{\exp(-\varepsilon_s(p)/k_B T)}{1 + \exp(-\varepsilon_s(p)/k_B T)}, \quad (6)$$

$k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $a_{sq}$  – коэффициенты в разложении закона дисперсии электронов (4) в ряд Фурье. Далее мы учитываем только первые 10 слагаемых в силу малости чисел  $b_q$  [20].

После обезразмеривания система уравнений (5) решалась численно с начальными условиями следующего вида:

$$\begin{aligned} A_1(r^2, z, 0) &= Q \cdot \exp(-z^2/l_z^2) \exp(-r^2/l_r^2), \\ dA_1(r^2, z, 0)/dt &= 2 \cdot v_o \cdot (z/l_z^2) \cdot Q \cdot \exp(-z^2/l_z^2) \exp(-r^2/l_r^2), \\ A_2(r^2, z, 0) &= 0, \quad dA_2(r^2, z, 0)/dt = 0, \quad r^2 = x^2 + y^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $Q$  – амплитуда электромагнитного импульса на входе в среду с УНТ,  $l_z, l_r$  – ширина импульса вдоль  $z$  и  $r$ .

### 3. Результаты численного моделирования и обсуждение

Эволюция интенсивности электромагнитного поля при его распространении по образцу для компоненты  $E_1$  показана на рис. 1.

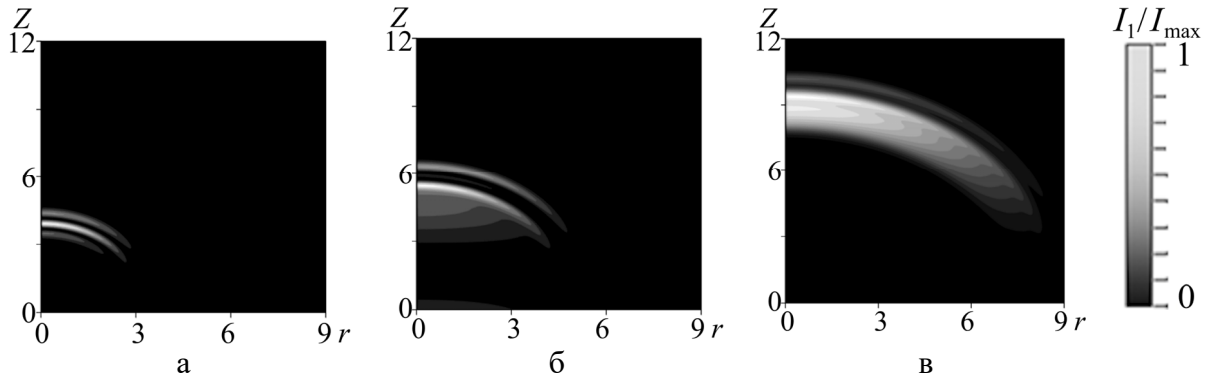


Рис. 1. Зависимость интенсивности для компоненты электрического поля  $E_1$  от координат ( $\chi=0,1$ ): а –  $\tau=2$ ; б –  $\tau=5$ ; в –  $\tau=9$ .  $I_1 \sim E_1^2$ ,  $I_{\max}$  – максимальное значение интенсивности для каждого момента времени.

Рис. 1 демонстрирует характерное поведение импульса, проявляющееся в его уширении и возникновении «хвоста» за основным импульсом, как и в случае распространения в оптически анизотропной среде с УНТ без полимера.

Далее будем исследовать влияние концентрации носителей заряда полимера на динамику электромагнитного импульса, чтобы выявить особенности поведения поля в случае композита. Зависимость формы предельно короткого оптического импульса для обеих компонент поля при разных значениях  $\chi$  представлена на рис. 2. Из рис. 2 видно, что введение в среду полимера способствует меньшему расплыванию импульса вдоль направления распространения, а также обеспечивает большие значения его интенсивности по сравнению со случаем без учета полимера. Аналогичное поведение наблюдается и для второй компоненты поля, которая в начальный момент времени отсутствовала.

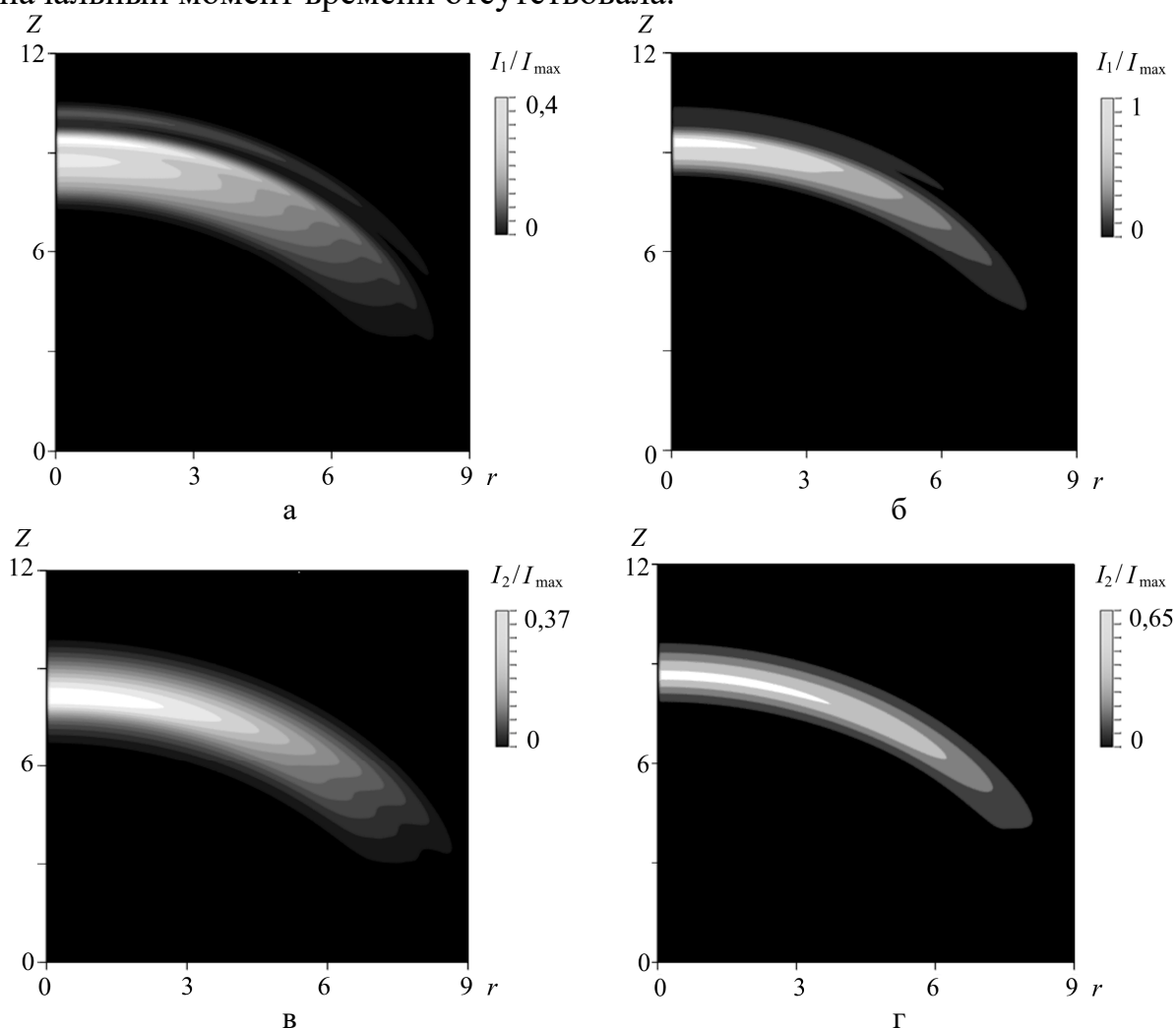


Рис. 2. Зависимость интенсивности от координат при  $\tau = 9$ : а, в –  $\chi = 0,0$ ; б, г –  $\chi = 0,5$ . Верхний ряд рисунков соответствует –  $I_1$ , нижний ряд –  $I_2$ .  $I_{\max}$  – максимальное значение интенсивности для всех рисунков а-г.

Продольные срезы интенсивности электрического поля импульса для разных значений  $\chi$  приведена на рис. 3. Видно, что концентрация носителей заряда полимера оказывает существенное влияние на амплитуду импульса для обеих его компонент. Отметим, что максимальная энергия импульса сохраняется в локализованной области, размер которой уменьшается с увеличением параметра  $\chi$ . На рис. 3 а для компоненты поля  $E_1$  наблюдается появление локальных максимумов на переднем фронте импульса, количество которых также можно контролировать за счет введения в среду с УНТ полимера.

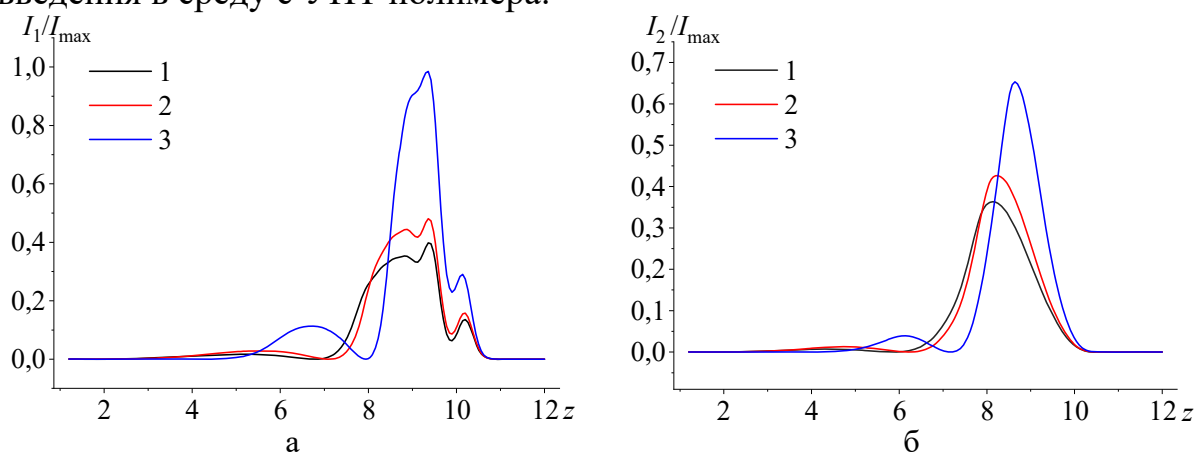


Рис. 3. Зависимость интенсивности от продольной координаты  $z$  при  $r=0$  ( $\tau=9$ ): для вкладки а построена интенсивность  $I_1/I_{\max}$ ; для вкладки б  $-I_2/I_{\max}$ . Линия 1 соответствует  $\chi=0,0$ , 2 –  $\chi=0,1$ , 3 –  $\chi=0,5$ .  $I_{\max}$  – максимальное значение интенсивности для всех рисунков.

#### 4. Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Построена модель, описывающая динамику предельно коротких оптических импульсов в композитном материале с углеродными нанотрубками с учетом оптической анизотропии среды.
2. Показано, что введение в оптически анизотропную среду композита с углеродными нанотрубками по сравнению со случаем только с УНТ, приводит к усилению электромагнитного импульса.
3. Выявлена возможность управления формой и амплитудой предельно короткого оптического импульса в оптически анизотропной среде при помощи концентрации полимеров. При этом более сильное влияние на интенсивность наблюдается для компоненты поля  $I_1$ .

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема «FZUU-2023-0001»).

**Библиографический список:**

1. **Chini, M.** The generation, characterization and applications of broadband isolated attosecond pulses / M. Chini, K. Zhao, Z. Chang // *Nature Photonics*. – 2014. – V. 8. – P. 178-186. DOI: 10.1038/NPHOTON.2013.362.
2. **Carlson, D.R.** Generating few-cycle pulses with integrated nonlinear photonics / D.R. Carlson, P. Hutchison, D.D. Hickstein, S.B. Papp // *Optics Express*. – 2019. – V. 27. – I. 26. – P. 37374-37382. DOI: 10.1364/OE.27.037374.
3. **Архипов, Р.М.** Генерация предельно коротких аттосекундных и терагерцовых импульсов на основе коллективного спонтанного излучения тонкой резонансной среды (Миниобзор) / Р.М. Архипов, М.В. Архипов, А.В. Пахомов и др. // *Письма в журнал экспериментальной и технической физики*. – 2021. – Т. 113. – Вып. 4. – С. 237-247. DOI: 10.31857/S1234567821040042.
4. **Архипов, Р.М.** Генерация предельно коротких импульсов терагерцового излучения на основе сверхизлучения трехуровневой резонансной среды / Р.М. Архипов, Н.Н. Розанов // *Оптика и спектроскопия*. – 2021. – Т. 129. – № 3. – С. 319-326. DOI: 10.21883/OS.2021.03.50659.274-20.
5. **Sazonov, S.V.** Few-cycle optical pulses in the gain media / S.V. Sazonov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – V. 1283. – Art. № 012013. – 5 с. DOI: 10.1088/1742-6596/1283/1/012013.
6. **Porras, M.A.** General laws of the propagation of few-cycle optical pulses with orbital angular momentum in free space / M.A. Porras, R. García-Alvarez // *Physical Review A*. – 2020. – V. 102. – I. 3. – Art. № 033522. – 13 p. DOI: 10.1103/PhysRevA.102.033522.
7. **Mihalache, D.** Localized structures in optical and matter-wave media: a selection of recent studies / D. Mihalache // *Romanian Reports in Physics*. – 2021. – V. 73. – № 2. – Art. № 403. – 40 p.
8. **Arhipov, R.M.** Population density gratings induced by few-cycle optical pulses in a resonant medium / R.M. Arhipov, A.V. Pakhomov, M.V. Arhipov et al. // *Scientific Reports*. – 2017. – V. 7. – Art. № 12467. – 21 p. DOI: 10.1038/s41598-017-12267-w.
9. **Schwab, M.B.** Few-cycle optical probe-pulse for investigation of relativistic laser-plasma interactions / M.B. Schwab, A. Sävert, O. Jäckel et al. // *Applied Physics Letters*. – 2013. – V. 103. – I. 19. – Art. № 191118. – 6 p. DOI: 10.1063/1.4829489.
10. **Sazonov, S.V.** Optical rectification and generation of harmonics under of propagation of few-cycle pulses in the birefringent medium with asymmetric molecules / S.V. Sazonov // *Journal of Russian Laser Research*. – 2018. – V. 39. – I. 3. – P. 252-262. DOI: 10.1007/S10946-018-9715-3.
11. **Hofferber, E.M.** Review – single walled carbon nanotubes as optical sensors for biological applications / E.M. Hofferber, J.A. Stapleton, N.M. Iverson // *Journal of the Electrochemical Society*. – 2020. – V. 167. – № 3. – Art. № 037530. – 9 p. DOI: 10.1149/1945-7111/ab64bf.
12. **Zhigunov, D.M.** Single-walled carbon nanotube membranes as non-reflective substrates for nanophotonic applications / D.M. Zhigunov, D.A. Shilkin, N.G. Kokareva et al. // *Nanotechnology*. – 2021. – V. 32. – № 9. – Art. 095206. – 8 p. DOI: 10.1088/1361-6528/abcacc.
13. **Konobeeva, N.N.** Propagation of ultrashort optical pulses in anisotropic optical media with carbon nanotubes / N.N. Konobeeva, M.B. Belonenko // *International Journal of Modern Physics B*. – 2021. – V. 35. – № 19. – Art. № 2150197. – 8 p. DOI: 10.1142/S0217979221501976.
14. **Дадашян, Л.Х.** Предельно короткие импульсы в оптически анизотропной среде, содержащей углеродные нанотрубки с металлической проводимостью / Л.Х. Дадашян, Р.П. Трофимов, Н.Н. Конобеева и др. // *Оптика и спектроскопия*. – 2022. – Т. 130. – Вып. 12. – С. 1861-1865. DOI: 10.21883/OS.2022.12.54092.49-22.
15. **Конобеева, Н.Н.** Распространение предельно коротких оптических импульсов в оптически анизотропной среде с примесными углеродными нанотрубками / Н.Н. Конобеева, М.Б. Белonenko // *Известия российской академии наук. Серия физическая*. – 2021. – Т. 85. – № 12. – С. 1706-1710. DOI: 10.31857/S0367676521120127
16. **Moses, J.K.** Carbon nanotubes and their polymer nanocomposites / J.K. Moses, A. Gangrade, B.B. Mandal // In: *Nanomaterials and polymer nanocomposites*. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – Ch. 5. – P. 145-175. DOI: 10.1016/B978-0-12-814615-6.00005-9.
17. **Матвеев, А.Н.** *Оптика* / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1985. – 351 с.
18. **Dresselhaus, M.S.** *Science of fullerenes and carbon nanotubes* / M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P.C. Eklund. – San Diego: Academic Press, 1996. – xviii + 965 pp.
19. **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 et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – V. 114. – I. 14. – Art. № 143106. – 7 p. DOI: 10.1063/1.4824370.
20. **Belonenko, M.B.** Electromagnetic solitons in a system of carbon nanotubes / M.B. Belonenko,

E.V. Demushkina, N.G. Lebedev // Journal of Russian Laser Research. – 2006. – V. 27. – I. 5. – P. 457-465.  
DOI: 10.1007/s10946-006-0027-7.

**References:**

1. Chini M., Zhao K., Chang Z. The generation, characterization and applications of broadband isolated attosecond pulses, *Nature Photonics*, 2014, vol. 8, pp. 178-186. DOI: 10.1038/NPHOTON.2013.362
2. Carlson D.R., Hutchison P., Hickstein D.D., Papp S.B. Generating few-cycle pulses with integrated nonlinear photonics, *Optics Express*, 2019, vol. 27, issue 26, pp. 37374-37382. DOI: 10.1364/OE.27.037374
3. Arhipov R.M., Arhipov M.V., Pahomov A.V. et al. Generation of ultrashort attosecond and terahertz pulses based on the collective spontaneous emission from a thin resonant medium (Brief Review), *JETP Letters*, 2021, vol. 113, issue 4, pp. 242-251. DOI: 10.1134/S0021364021040081.
4. Arkhipov R.M., Rosanov N.N. Generation of extremely short pulses of terahertz radiation based on superradiance of a three-level resonant medium, *Optics and Spectroscopy*, 2021, vol. 129, issue 3, pp. 289-296. DOI: 10.21883/OS.2021.03.50659.274-20.
5. Sazonov S.V. Few-cycle optical pulses in the gain media, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1283, art. no. 012013, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1283/1/012013.
6. Porras M.A., García-Álvarez R. General laws of the propagation of few-cycle optical pulses with orbital angular momentum in free space, *Physical Review A*, 2020, vol. 102, issue 3, art. no. 033522, 13 p. DOI: 10.1103/PhysRevA.102.033522.
7. Mihalache D. Localized structures in optical and matter-wave media: a selection of recent studies, *Romanian Reports in Physics*, 2021, vol. 73, no. 2, art. no. 403, 40 p.
8. Arkhipov R.M., Pakhomov A.V., Arkhipov M.V. et al. Population density gratings induced by few-cycle optical pulses in a resonant medium, *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, art. no. 12467, 21 p. DOI: 10.1038/s41598-017-12267-w.
9. Schwab M.B., Sävert A., Jäckel O. et al. Few-cycle optical probe-pulse for investigation of relativistic laser-plasma interactions, *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, issue 19, art. no. 191118, 6 p. DOI: 10.1063/1.4829489.
10. Sazonov S.V. Optical rectification and generation of harmonics under of propagation of few-cycle pulses in the birefringent medium with asymmetric molecules, *Journal of Russian Laser Research*, 2018, vol. 39, issue 3, pp. 252-262. DOI: 10.1007/S10946-018-9715-3.
11. Hofferber E.M., Stapleton J.A., Iverson N.M. Review – single walled carbon nanotubes as optical sensors for biological applications, *Journal of the Electrochemical Society*, 2020, vol. 167, no. 3, art. no. 037530, 9 p. DOI: 10.1149/1945-7111/ab64bf.
12. Zhigunov D.M., Shilkin D.A., Kokareva N.G et al. Single-walled carbon nanotube membranes as non-reflective substrates for nanophotonic applications, *Nanotechnology*, 2021, vol. 32, no. 9, art. no. 095206, 8 p. DOI: 10.1088/1361-6528/abcacc.
13. Konobeeva N.N., Belonenko M.B. Propagation of ultrashort optical pulses in anisotropic optical media with carbon nanotubes, *International Journal of Modern Physics B*, 2021, vol. 35, no. 19, art. no. 2150197, 8 p. DOI: 10.1142/S0217979221501976.
14. Dadashyan L.H., Trofimov R.R., Konobeeva N.N. et al. Extremely short pulses in an anisotropic optical medium containing carbon nanotubes with metal conduction, *Optics and Spectroscopy*, 2022, vol. 130, issue 2, pp. 1575-1578. DOI: 10.21883/OS.2022.12.54092.49-22.
15. Konobeeva N.N., Belonenko M.B. Propagation of ultrashort optical pulses in anisotropic optical media with impurity-containing carbon nanotubes, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2021, vol. 85, issue 12, pp. 1359-1362. DOI: 10.3103/S1062873821120121.
16. Moses J.K., Gangrade A., Mandal B.B. Carbon nanotubes and their polymer nanocomposites, *Nanomaterials and polymer nanocomposites*. Amsterdam, Elsevier, 2019, chapter 5, pp. 145-175. DOI: 10.1016/B978-0-12-814615-6.00005-9.
17. Matveev A.N. *Optika [Optics]*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 351 p. (In Russian).
18. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Eklund P.C. *Science of fullerenes and carbon nanotubes*. San Diego, Academic Press, 1996, xviii + 965 pp.
19. Zhukov A.V., Bouffanais R., Fedorov E.G et al. Three-dimensional electromagnetic breathers in carbon nanotubes with the field inhomogeneity along their axes, *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 114, issue 14, art. no. 143106, 7 p. DOI: 10.1063/1.4824370.
20. Belonenko M.B., Demushkina E.V., Lebedev N.G. Electromagnetic solitons in a system of carbon nanotubes, *Journal of Russian Laser Research*, 2006, vol. 27, issue 5, pp. 457-465. DOI: 10.1007/s10946-006-0027-7.