УДК 538.9: 535.5 *Оригинальная статья*

Импульсы Бесселя в неоднородном массиве углеродных нанотрубок при механическом воздействии

Н.Н. Янюшкина
yana_nn@volsu.ru
ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»
400062, Россия, Волгоград, Университетский проспект, 100
yana_nn@volsu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.322

Аннотация: В работе численно исследуется распространение бездифракционных импульсов Бесселя в неоднородном массиве углеродных нанотрубок, содержащем как металлические («кресло»), так и полупроводниковые («зигзаг») трубки. Актуальность обусловлена тем, что реальные синтезируемые образцы всегда представляют собой смесь трубок различной хиральности, что существенно влияет на динамику электромагнитных полей. На основе модели, учитывающей нелинейный отклик среды и пространственную модуляцию плотности трубок, решается эволюционное уравнение для векторного потенциала. Показано, что бесселевы импульсы сохраняют свою локализацию на значительных расстояниях даже в неоднородном массиве нанотрубок и в присутствии механических деформаций. Особое внимание уделено влиянию механической нагрузки (внешнее сжатие или растяжение), которая моделируется через внешнее поле напряжений. Установлено, что изменение концентрации металлических трубок наряду с деформацией позволяет эффективно управлять формой импульсов, а также подавлять их расплывание. Полученные результаты открывают перспективы для разработки опто-механических устройств, в которых механическая нагрузка служит эффективным инструментом управления параметрами бесселевых импульсов.
Ключевые слова: углеродные нанотрубки «зигзаг» и «кресло», импульсы Бесселя, механическая деформация.

Янюшкина Наталия Николаевна – д.ф.-м.н., профессор кафедры информационных систем и компьютерного моделирования ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет»

Original Paper

Bessel pulses in an inhomogeneous array of carbon nanotubes under mechanical action

N.N. Yanyushkina
Volgograd State University, Volgograd, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.322

Abstract: In this work, the propagation of non-diffracting Bessel pulses in an inhomogeneous array of carbon nanotubes containing both metallic (armchair) and semiconducting (zigzag) tubes is numerically investigated. The relevance arises from the fact that real synthesized samples always represent a mixture of tubes of different chiralities, which significantly affects the dynamics of electromagnetic fields. Based on a model that accounts for the nonlinear response of the medium and the spatial modulation of the tube density, an evolution equation for the vector potential is solved. It is shown that Bessel pulses retain their localization over significant distances even in an inhomogeneous nanotube array and in the presence of mechanical deformations. Special attention is paid to the effect of mechanical loading (external compression or tension), which is modeled via an external stress field. It is found that varying the concentration of metallic tubes along with deformation enables effective control of the pulse shape and suppression of their spreading. The obtained results open up prospects for the development of optomechanical devices, in which mechanical loading serves as an efficient tool for controlling the parameters of the Bessel pulses.
Keywords: zigzag and armchair carbon nanotubes, Bessel pulses, mechanical deformation.

Natalia N. Yanyushkina – Dr. Sc., Professor, Department of information systems and computer simulation, Volgograd State University, ORCID: 0000-0002-6043-9555

Поступила в редакцию/received: 07.08.2026; после рецензирования/revised: 22.09.2026; принята/accepted 24.09.2026.
© Н.Н. Янюшкина, 2026

1. Введение

В последние годы значительное внимание исследователей привлекают бездифракционные волновые поля, способные сохранять свою поперечную структуру на протяжении многих дифракционных длин. К полям такого типа относятся, например, лазерные пучки Бесселя [1] и пучки Эйри [2]. Сосредоточим внимание на импульсах Бесселя, которые являются точными решениями свободного волнового уравнения и описываются поперечным распределением амплитуды через функции Бесселя первого рода. Их ключевые особенности – высокая концентрация энергии в центральном ядре, протяжённая область бездифракционного распространения и уникальное свойство самовосстановления после прохождения локальных неоднородностей или препятствий. Эти качества делают Бесселевы пучки привлекательными для широкого круга задач, от оптического захвата и манипулирования микрообъектами до лазерной микрообработки, микроскопии с увеличенной глубиной фокуса и квантовой связи [3]. Однако идеальные Бесселевы пучки, подобно плоским волнам, обладают бесконечной энергией и поэтому физически нереализуемы. На практике используются их аппроксимации с конечной апертурой – конечные Бесселевы пучки. Несмотря на энергетические ограничения, такие пучки демонстрируют значительно большую длину распространения по сравнению с гауссовыми пучками того же поперечного размера. За последние десятилетия разработано несколько эффективных методов их генерации: аксиконы, дифракционные оптические элементы, пространственные модуляторы света и голографические техники [4], что позволило успешно реализовать Бесселевы пучки в лабораторных условиях и адаптировать их для практических нужд, включая оптические пинцеты и манипуляции нанообъектами [5].

С другой стороны, большой интерес представляют углеродные нанотрубки (УНТ). В качестве одной из наиболее важных особенностей которых можно отметить возможность использования их в качестве среды для образования локализованных импульсов [6, 7]. Авторами уже исследовалось взаимодействие пучков Бесселя с углеродными нанотрубками, в том числе с учетом многоуровневых примесей [8] и в оптическом резонаторе с УНТ с переменным показателем преломления [9]. Продемонстрирован квазистабильный характер распространения таких пучков с течением времени и возможность управления их скоростью за счет изменения периода модуляции плотности трубок. При этом не изучался вопрос взаимодействия таких импульсов со смешанным массивом углеродных нанотрубок, содержащим УНТ разного типа проводимости. Такой выбор обусловлен тем, что трудно синтезировать

абсолютно чистые массивы [10-12], что существенно модифицирует нелинейный отклик и дисперсионные свойства среды. Изучение эволюции Бесселевых импульсов в подобных структурах важно для понимания пределов их бездифракционного распространения в материальных средах и для разработки новых управляемых элементов нанофотоники. Отметим также, что в данной работе учитывается и деформация, что особенно важно для реальных устройств, где нанотрубки могут быть интегрированы в гибкие подложки или подвергаться внешним напряжениям в процессе эксплуатации [13, 14].

2. Основные уравнения

Опишем геометрию задачи: импульс, состоящий из одного колебания поля [15], движется сквозь массив вертикально выровненных УНТ [16], в котором присутствуют трубки двух типов. Под действием импульса с волновым вектором перпендикулярным осям УНТ в системе появляется электрический ток, сонаправленный с вектором электрического поля импульса $\vec{E}$ и параллельный оси нанотрубок – OX. Отметим, что учитывается только одна компонента тока вдоль оси трубок, поскольку это основное направление электронного транспорта, в то время как движение по окружности квантовано и вносит пренебрежимо малый вклад в макроскопический ток.

Здесь применяется подход, в котором вместо уравнений Максвелла можно использовать одно эффективное уравнение на векторный потенциал электрического поля [17] $\vec{A} = (A(x,z,t),0,0)$:

$$\frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial z^2} + \frac{4\pi}{c} N_{\text{zig}} \cdot \vec{j}_{\text{zig}}\left(\vec{A}\right) + \frac{4\pi}{c} N_{\text{arm}} \cdot \vec{j}_{\text{arm}}\left(\vec{A}\right), \quad (1)$$

где υ – скорость света в среде, $\vec{j}_{\text{zig}}$ и $\vec{j}_{\text{arm}}$ – плотность электрического тока вклады «зигзаг» (zigzag) и «кресло» (armchair) УНТ, N_{zig}, N_{arm} – доля каждого типа УНТ в массиве соответственно.

При описании механической деформации возникает поле напряжений, которое задаётся векторным потенциалом A_{mech}, изменяющим квазиимпульс электронов в системе с углеродными нанотрубками. Деформация УНТ под действием сжатия/растяжения приведет к поправке в последних слагаемых формулы (1): $A \to A + A_{\text{mech}}$. Здесь не приводится подробный вывод данного выражения, все пояснения можно найти в работе [18].

Вычисляя далее компоненты электрического по формуле [19]:

$$j = 2e\int_{BZ} v(p)\cdot f(p)\,dp, \quad (2)$$

здесь e – заряд электрона, BZ – первая зона Бриллюэна, p – квазиимпульс

электрона вдоль оси УНТ, $f(p)$ – функция распределения Ферми, $v(p)=\partial\varepsilon(p)/\partial p$ – скорость электронов, $\varepsilon(p)$ – энергетический спектр, который вычисляется по одной из двух формул для zigzag $\varepsilon_{\text{zig}}(p)$ (формула (3)) [20] и armchair $\varepsilon_{\text{arm}}(p)$ (формула (4)) [21] углеродных нанотрубок:

$$\varepsilon_{zig}(p)=\gamma_0\sqrt{1+4cos\left(\frac{3bp}{2\hbar}\right)cos\left(\frac{\pi s}{m}\right)+4cos^2\left(\frac{\pi s}{m}\right)}, \tag{3}$$

$$\varepsilon_{arm}(p)=\gamma_0\sqrt{1+4cos\left(\frac{\sqrt{3}bp}{2\hbar}\right)cos\left(\frac{\pi q}{n}\right)+4cos^2\left(\frac{\pi q}{n}\right)}, \tag{4}$$

где $s=\overline{1,m}$, m – хиральный индекс УНТ zigzag $(m,0)$, γ_0 – интеграл перескока электрона, b – длина связи C-C в УНТ, $q=\overline{1,2n}$, n – хиральный индекс УНТ armchair (n,n). Раскладывая дисперсионные соотношения (3) и (4) в ряд Фурье, работая в бесстолкновительном приближении, получаем следующее выражение для плотности тока:

$$\begin{gathered}
j_{\text{zig}}=e\cdot C_{\text{zig}}\gamma_0\sum_{r=1}^{\infty}r\,G_r^{\text{zig}}\sin\left(\frac{rea\left(A+A_{\text{mech}}\right)}{c}\right),\\
G_r^{\text{zig}}=-\sum_{s=1}^{m}\frac{B_{r,s}^{\text{zig}}}{\gamma_0}\int_{1BZ}\frac{\cos\left(rap/c\right)}{1+\exp\left(\sum_{r=1}^{\infty}B_{r,s}^{zig}\cos\left(rap/c\right)-\mu\right)}d\left(ap\right),\\
j_{\text{arm}}=e\cdot C_{\text{arm}}\gamma_0\sum_{r=1}^{\infty}r\,G_r^{\text{arm}}\sin\left(\frac{rea\left(A+A_{\text{mech}}\right)}{c}\right),\\
G_r^{\text{arm}}=-\sum_{q=1}^{2n}\frac{B_{r,\text{q}}^{\text{arm}}}{\gamma_0}\int_{1BZ}\frac{\cos\left(rap/c\right)}{1+\exp\left(\sum_{r=1}^{\infty}B_{r,\text{q}}^{\text{arm}}\cos\left(rap/c\right)-\mu\right)}d\left(ap\right),
\end{gathered} \tag{5}$$

где $a=\sqrt{3}b$ – постоянная решетки, $B_{r,s}^{\text{zig}}$ и $B_{r,q}^{\text{arm}}$ – коэффициенты разложения (3) и (4) в ряд Фурье, μ – химический потенциал, C_{zig}, C_{arm} – концентрация электронов проводимости в УНТ каждого типа. Отметим, что для увеличения концентрации C_{zig} используется электростатическое легирование [22] для сдвига уровня Ферми. Омическими потерями для armchair нанотрубок пренебрегаем, так как рассматривается баллистический транспорт, время релаксации значительно превышает время наблюдения и длительность импульса, поэтому диссипация не успевает развиться. В работе рассматриваются углеродные нанотрубки типов (10,0) и (6,6), диаметры которых близки по значению.

После обезразмеривания уравнение (1) при учете формул (3)-(5) решалось численно с начальными условиями в виде функции Бесселя в поперечном направлении:

$$A(x,z,0)=Q\cdot exp\left(-\frac{z^2}{l_z^2}\right)\cdot J_0\left(\frac{|x|}{l_x}\right)\cdot exp\left(-\alpha\frac{|x|}{l_x}\right),$$
$$\frac{dA(x,z,0)}{dt}=2\cdot\upsilon\cdot\frac{z}{l_z^2}\cdot Q\cdot exp\left(-\frac{z^2}{l_z^2}\right)\cdot J_0\left(\frac{|x|}{l_x}\right)\cdot exp\left(-\alpha\frac{|x|}{l_x}\right) \quad (6)$$

где Q – амплитуда электромагнитного импульса на входе в среду с УНТ, $l_x, l_z,$ – ширина импульса вдоль OX и OZ, α – параметр обрезания, который вводится для физической реализации импульса с конечной энергией [23].

3. Результаты численного моделирования и обсуждение

Временная эволюция импульса с бесселевым поперечным сечением показана на рис. 1.

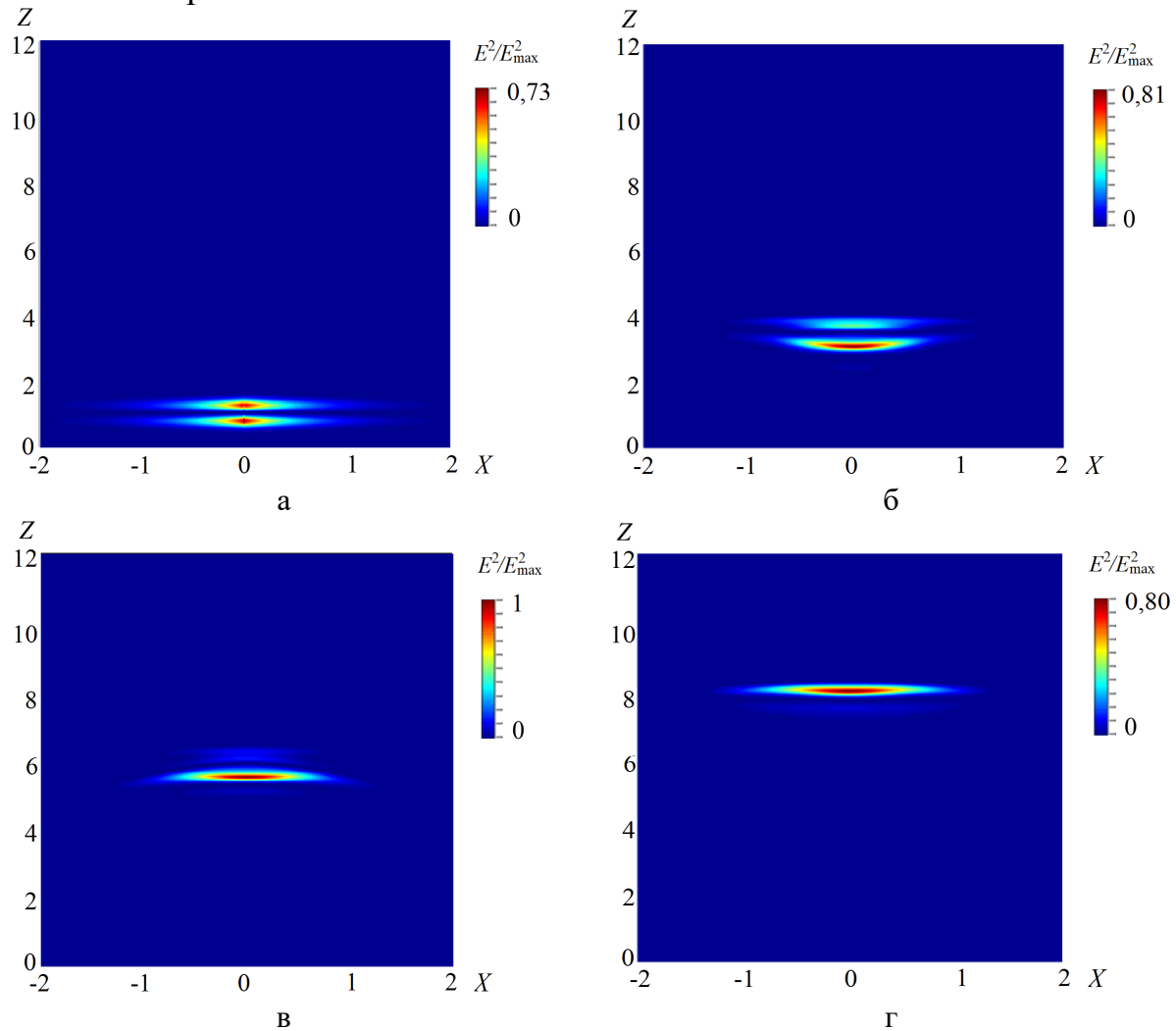

Рис. 1. Распределение величины E^2 для соотношения долей УНТ N_{zig} / N_{arm} =70%/30%, A_{mech}=0: а – $\tau=0$, б – $\tau=3$, в – $\tau=6$, г – $\tau=9$. Здесь и далее E_{max} – максимальное значение поля для всех рисунков а-г.

Рис. 1 демонстрирует, что смешанный состав массива из УНТ

приводит к тому, что с течением времени импульс перестраивается и вместо двух формируется один пик для величины квадрата поля, который стабильно распространяется, сохраняя свою пространственную форму. Что касается энергии, то имеют место колебания напряженности электрического поля. Более подробно характер этих колебаний исследуем с помощью рис. 2, на котором представлена зависимость максимума величины E^2 от времени для разной доли zigzag и armchair трубок в массиве.

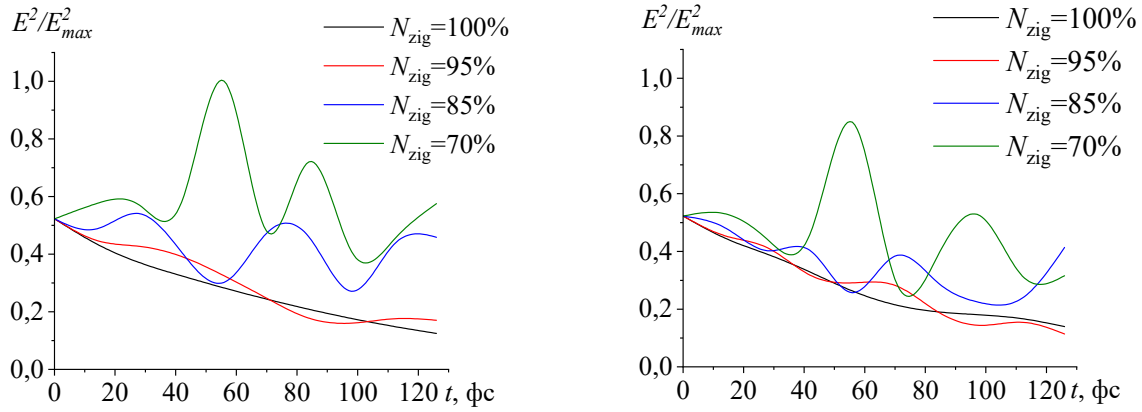

Рис. 2. Зависимость квадрата поля от времени для разной доли нанотрубок zigzag: а – $A_{mech} = 0{,}0$; б – $A_{mech} = 0{,}1$.

Из рис. 2 видно, что в среде, содержащей только zigzag УНТ импульс постепенно затухает и расплывается. При добавлении armchair трубок наблюдается квазипериодические колебания величины квадрата поля, причем при увеличении доли кресельных УНТ усредненная по времени амплитуда поля увеличивается. Поскольку armchair трубки являются металлическими, они могут обладать сильным внутренним резонансом, а также имеют аномально сильную электрон-фононную связь. Это приводит к тому, что при облучении лазером они порождают мощные когерентные колебания решетки, которые проявляются в виде ярко выраженных осцилляций поля импульса во времени. Отметим, что учет механической нагрузки (см. рис. 2 б) приводит к меньшим по амплитуде колебаниям поля, чем в ее отсутствии.

Влияние поля деформаций оценим при помощи рис. 3. Видно, что увеличение механической нагрузки в целом приводит к снижению максимальных значений нормированной энергии и сглаживанию временных пиков, что связано с ростом диссипативных потерь внутри нанотрубок. Однако в массиве с большей долей armchair эта зависимость демонстрирует немонотонность: при A_{mech}=0,05 имеет место локальное усиление сигнала. В рамках модели независимых трубок это объясняется тем, что малая деформация сдвигает собственную плазмонную частоту индивидуальных металлических УНТ к частоте возбуждающего импульса,

усиливая их когерентный вклад в общую поляризацию среды. При увеличении концентрации armchair (до 30%) этот аддитивный резонансный вклад становится доминирующим, тогда как при низкой концентрации (15%) он маскируется фоновым сигналом полупроводниковых zigzag-трубок.

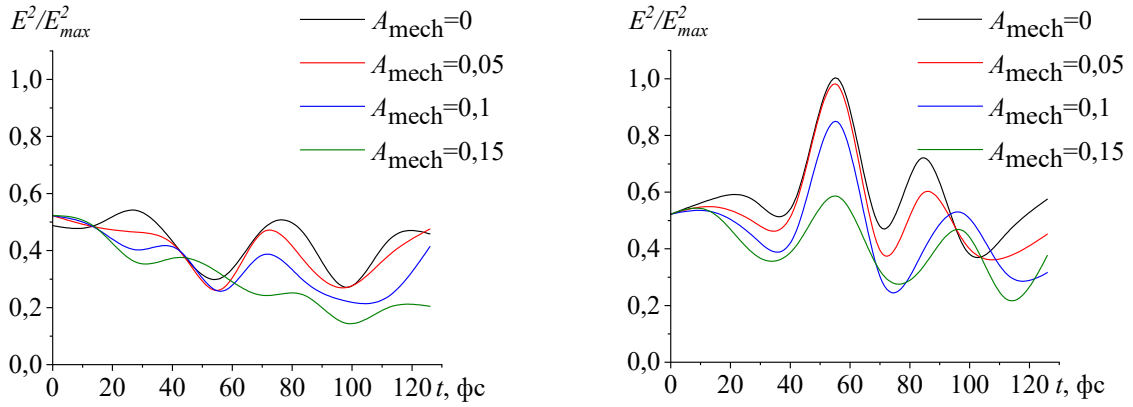

Рис. 3. Зависимость квадрата поля от времени для разных значений механической нагрузки: а – N_{zig} = 85%, б – N_{zig} = 70%.

4. Заключение

Результаты исследований показали, что в среде, состоящей исключительно из полупроводниковых нанотрубок (zigzag), бесселев импульс теряет бездифракционную поддержку из-за отсутствия сильного нелинейного отклика и плазмонных резонансов, что приводит к дифракционному расплыванию и диссипативному затуханию поля. Добавление металлических нанотрубок (armchair) вносит в систему свободные носители, обеспечивая наличие собственных плазмонных мод в каждой отдельной трубке. В рамках макроскопической модели эффективной среды это обеспечивает возникновение сильного когерентного вклада в общую поляризацию, который при взаимодействии с импульсом порождает квазипериодические биения поля. Рост концентрации металлических нанотрубок (armchair) усиливает эффективную нелинейность среды, что способствует подавлению дифракционного расплывания. Поэтому усредненная по времени амплитуда поля в смешанном массиве возрастает, несмотря на наличие диссипативных потерь. Увеличение поля деформаций приводит к изменению межатомных расстояний внутри каждой отдельной трубки, что вызывает сдвиг собственных плазмонных частот armchair трубок и одновременно усиливает диссипативные потери за счет открытия дополнительных каналов рассеяния. Выявленные закономерности открывают перспективы для практического применения подобных

смешанных массивов УНТ в качестве компонент сверхбыстрых оптомеханических переключателей и высокочувствительных датчиков механической нагрузки, а также перестраиваемых спектральных фильтров и волоконных модуляторов интенсивности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта FZUU-2026-0005 «Разработка методов моделирования сложных систем на основе интеграции прямых вычислительных экспериментов и интеллектуального анализа данных».

Библиографический список:

1. **Durnin, J.** Diffraction-free beams / J. Durnin, J.J. Miceli, J.H. Eberly // Physical Review Letters. – 1987. – V. 58. – I. 15. – P. 1499-1501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.1499.
2. **Berry, M.V.** Nonspreading wave pockets / M.V. Berry, N.L. Balazs // American Journal of Physics. – 1979. – V. 47. – I. 3. – P. 264-267. DOI: 10.1119/1.11855.
3. **Khonina, S.N.** Bessel beam: significance and applications – a progressive review / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.V. Karpeev et al. // Micromachines. – 2020. – V. 11. – I. 11. – Art. № 997. – 27 p. DOI: 10.3390/mi11110997.
4. **Moreno, I.** Nondiffracting Bessel beams with polarization state that varies with propagation distance / I. Moreno, J.A. Davis, M.M. Sánchez-López et al. // Optics Letters. – 2015. – V. 40. – I. 23. – P. 5451-5454. DOI: 10.1364/OL.40.005451.
5. **Moura, T.A.** Modulating the trapping and manipulation of semiconductor particles using Bessel beam optical tweezers / T.A. Moura, U.M.S. Andrade, J.B.S. Mendes et al. // Optics and Lasers in Engineering. – 2023. – V. 170. – Art. № 107778. – 9 p. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2023.107778.
6. **Белоненко, М.Б.** Двумерные световые пули в массиве углеродных нанотрубок / М.Б. Белоненко, Н.Г. Лебедев, А.С. Попов // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2010. – Т. 91. – Вып. 9. – С. 506-510.
7. **Konobeeva, N.N.** Stabilization of ultrashort pulses by external pumping in an array of carbon nanotubes subject to piezoelectric effects / N.N. Konobeeva, E.G. Fedorov, N.N. Rosanov et al. // Journal of Applied Physics. – 2019. – V. 126. – I. 20. – Art. № 203103. – 8 p. DOI: 10.1063/1.5128365.
8. **Belonenko, M.B.** Two-dimensional non-topological solutions of Maxwell's equations in a medium of strained carbon nanotubes with impurities / M.B. Belonenko, N.N. Konobeeva // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2022. – V.13. – I. 1. – P. 45-49. DOI: 10.17586/2220-8054-2022-13-1-45-49.
9. **Белоненко, А.М.** Световые пули с бесселевым поперечным сечением в среде углеродных нанотрубок / А.М. Белоненко, И.С. Двужилов, Ю.В. Двужилова и др. // Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130. – Вып. 3. – С. 407-413. DOI: 10.21883/OS.2022.03.52170.2642-21.
10. **Artyukhov, V.I.** Why nanotubes grow chiral / V.I. Artyukhov, E.S. Penev, B.I. Yakobson // Nature Communications. –2014. – V. 5. – Art. № 4892. – 6 p. DOI: 10.1038/ncomms5892.
11. **Zhang, S.** Growth of single-walled carbon nanotubes with different chirality on same solid cobalt catalysts at low temperature / S. Zhang, D. Lin, W. Liu et al. // Small. – 2019. – V. 15. – I. 46. – Art. № 1903896. – 6 p. DOI: 10.1002/smll.201903896.
12. **Li, Y.** An efficient approach toward production of near-zigzag single-chirality carbon nanotubes / Y. Li, L. Li, H. Jiang et al. // Science Advances. – 2024. – V. 10. – I. 14. – Art. № eadn6519. – 8 p. DOI: 10.1126/sciadv.adn651.
13. **Hu, L.** Percolation in transparent and conducting carbon nanotube networks / L. Hu, D. S. Hecht, G. Gruner // Nano Letters. – 2004. – V. 4. – I. 12. – P. 2513-2517. DOI: 10.1021/nl048435y.
14. **Wang, X.** Review of carbon nanotube-based flexible wearable strain sensors: from materials to applications for human body // X. Wang, C. Jin, Z. Bai //Sensors and Actuators A: Physical. – 2025. – V. 395. – Art. № 117071. – 22 p. DOI: 10.1016/j.sna.2025.117071.
15. **Козлов, С.А.** Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах / С.А. Козлов, С.В. Сазонов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1997. – Т. 111. – Вып. 2. – С. 404-418.
16. **Kohls, A.** Vertically aligned carbon nanotubes as a unique material for biomedical applications/ A. Kohls, M.M. Ditty, F. Dehghandehnavi et al. // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2022. – V. 14. – I. 5.

– P. 6287-6306. DOI: 10.1021/acsami.1c20423.
17. **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.
18. **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. – Вып. 12. – С. 2474-2478.
19. **Басс, Ф.Г.** Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками / Ф.Г. Басс, А.А. Булгаков, А.П. Тетервов. – М.: Наука, 1989. – 286 с.
20. **Saito, R.** Physical properties of carbon nanotubes / R. Saito, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus. – London: Imperial College Press, 1998. – XII+259 p.
21. **Chiu, C.W.** Electron lifetime in armchair carbon nanotubes / C.W. Chiu, F.L. Shyu, C.P. Chang et al. // Journal of the Physical Society of Japan. – 2004. – V. 73. – № 11. – P. 2936-2939. DOI: 10.1143/jpsj.73.2936.
22. **Cristoloveanu, S.** The concept of electrostatic doping and related devices/ S. Cristoloveanu, K.H. Lee, H. Park et al. // Solid State Electronics. – 2019. – V. 155. – P. 32-43. DOI: 10.1016/j.sse.2019.03.017.
23. **Chong, A.** Airy–Bessel wave packets as versatile linear light bullets / A. Chong, W.H. Renninger, D.N. Christodoulides et al. // Nature Photonics. – 2010. – V. 4. – P. 103-106. DOI: 10.1038/nphoton.2009.264.

References:

1. Durnin J., Miceli J.J., Eberly J.H. Diffraction-free beams, *Physical Review Letters,* 1987, vol. 58, issue 15, pp. 1499-1501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.1499.
2. Berry M.V., Balazs, N.L. Nonspreading wave pockets, *American Journal of Physics*, 1979, vol. 47, issue 3, pp. 264-267. DOI: 10.1119/1.11855.
3. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Karpeev S.V. et al. Bessel beam: significance and applications – a progressive review, *Micromachines*, 2020, vol. 11, issue 11, art. no. 997, 27 p. DOI: 10.3390/mi11110997.
4. Moreno I., Davis J.A., Sánchez-López M.M. et al. Nondiffracting Bessel beams with polarization state that varies with propagation distance, *Optics Letters*, 2015, vol. 40, issue 23, pp. 5451-5454. DOI: 10.1364/OL.40.005451.
5. Moura T.A., Andrade U.M.S., Mendes J.B.S. et al. Modulating the trapping and manipulation of semiconductor particles using Bessel beam optical tweezers, *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, vol. 170, art. no. 107778, 9 p. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2023.107778.
6. Belonenko M.B., Lebedev N.G., Popov A.S. Two-dimensional light bullets in an array of carbon nanotubes, *JETP Letters*, 2010, vol. 91, issue 9, pp. 461-465. DOI: 10.1134/S0021364010090067.
7. Konobeeva N.N., Fedorov E.G., Rosanov N.N. et al. Stabilization of ultrashort pulses by external pumping in an array of carbon nanotubes subject to piezoelectric effects, *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, issue 20, art. no. 203103, 8 p. DOI: 10.1063/1.5128365.
8. Belonenko M.B., Konobeeva N.N. Two-dimensional non-topological solutions of Maxwell's equations in a medium of strained carbon nanotubes with impurities, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2022, vol.13, issue 1, pp. 45-49. DOI: 10.17586/2220-8054-2022-13-1-45-49.
9. Belonenko A.M., Dvuzhilov I.S., Dvuzhilova Yu.V. et al. Light bullets with Bessel cross section in the environment carbon nanotubes, *Optics and Spectroscopy*, 2022, vol. 130, issue 3, pp. 407-413. DOI: 10.21883/OS.2022.03.52170.2642-21.
10. Artyukhov V.I., Penev E.S., Yakobson B.Y. Why nanotubes grow chiral, *Nature Communications*, 2014, vol. 5. art. no. 4892, 6 p. DOI: 10.1038/ncomms5892.
11. Zhang S., Lin D., Liu W. et al. Growth of single-walled carbon nanotubes with different chirality on same solid cobalt catalysts at low temperature, *Small*, 2019, vol. 15, issue. 46, art. no. 1903896, 6 p. DOI: 10.1002/smll.201903896.
12. Li Y., Li L., Jiang H. et al. An efficient approach toward production of near-zigzag single-chirality carbon nanotubes, *Science Advances*, 2024, vol. 10, issue 14, art. no. eadn6519, 8 p. DOI: 10.1126/sciadv.adn651.
13. Hu L., Hecht D.S., Gruner G. Percolation in transparent and conducting carbon nanotube networks, *Nano Letters*, 2004, vol. 4, issue 12, pp. 2513-2517. DOI: 10.1021/nl048435y.
14. Wang X., Jin C., Bai Z. Review of carbon nanotube-based flexible wearable strain sensors: from materials to applications for human body, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2025, vol. 395, art. no. 117071, 22 p. DOI: 10.1016/j.sna.2025.117071.
15. Kozlov S.A., Sazonov S.V. Nonlinear propagation of optical pulses of a few oscillations duration in dielectric media, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1997, vol. 84, issue 2, pp. 221-228. DOI: 10.1134/1.558109.

16. Kohls A., Ditty M.M., Dehghandehnavi F. et al. Vertically aligned carbon nanotubes as a unique material for biomedical applications, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2022, vol. 14, issue 5, pp. 6287-6306. DOI: 10.1021/acsami.1c20423.
17. 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.
18. Lyapkosova O.S., Lebedev N.G., Belonenko M.B. Extremely short optical pulses in strained graphene in terms of the gauge theory, *Physics of the Solid State*, 2013, vol. 55, issue 12, pp. 2602-2607. DOI: 10.1134/S1063783413120226.
19. Bass F.G., Bulgakov A.A., Tetrvov A.P. *Vysokochastotnye svoystva poluprovodnikov so sverkheshetkami [High-frequency properties of semiconductors with superlattices]*. Moscow, Nauka, 1989, 286 p. (In Russian).
20. Saito R., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S. *Physical properties of carbon nanotubes*. London: Imperial College Press, 1998, XII+259 p.
21. Chiu C.W., Shyu F.L., Chang C.P. et al. Electron lifetime in armchair carbon nanotubes, *Journal of the Physical Society of Japan*, 2004, vol. 73, no. 11, pp. 2936-2939. DOI: 10.1143/jpsj.73.2936.
22. Cristoloveanu S., Lee K.H., Park H. et al. The concept of electrostatic doping and related devices, *Solid State Electronics*, 2019, vol. 155, pp. 32-43. DOI: 10.1016/j.sse.2019.03.017.
23. Chong A., Renninger W.H., Christodoulides D.N. et al. Airy–Bessel wave packets as versatile linear light bullets, *Nature Photonics*, 2010, vol. 4, pp. 103-106. DOI: 10.1038/nphoton.2009.264.