01

Моделирование динамики предельно коротких импульсов в полимерном композите с графеновыми лентами, содержащими металлические наночастицы

© Н.Н. Конобеева

Волгоградский государственный университет,
400062 Волгоград, Россия
e-mail: yana_nn@volsu.ru

Поступило в Редакцию 21 ноября 2024 г.
В окончательной редакции 21 ноября 2024 г.
Принято к публикации 21 ноября 2024 г.

Исследована эволюция двумерного и трехмерного электромагнитного импульса малой длительности при его взаимодействии с композитом из полимера и графеновых нанолент, содержащих металлические наночастицы (атомы, адсорбированные на графеновой поверхности). На основе волнового уравнения с учетом вкладов в ток нанолент и полимера получено эффективное уравнение векторного потенциала электрического поля импульса. Обнаружено, что введение металлических адатомов в полимерную матрицу вызывает изменение величины амплитуды волны, распространяющейся в такой системе. Проанализированы параметры электромагнитной волны в зависимости от вида импульса (двумерного и трехмерного), типа металлической частицы, а также концентрации полимера в композите.

Ключевые слова: полимерный композит, графеновые наноленты, металлические наночастицы, электромагнитные импульсы.

DOI: 10.61011/JTF.2025.03.59852.419-24

Введение

В последние несколько десятилетий уникальные свойства наноструктур на основе углерода активно используются в совершенно разных областях научных разработок и современной техники, в том числе полупроводниковой, оптоэлектронной и др. Так, в области нелинейной оптики одной из приоритетных задач является подбор материала, который мог бы обеспечить определенные искомые параметры электромагнитных импульсов. В качестве перспективных кандидатов можно выделить углеродные нанотрубки (УНТ) [1,2] и другие графеноподобные материалы (графеновые ленты, силицен, германен) [3]. Так, в работах [4,5] продемонстрирована возможность стабильного распространения в таких структурах импульсов, содержащих несколько колебаний электромагнитного поля, как правило от 1 до 3 (такие импульсы принято называть предельно короткими (ПКИ)), вследствие баланса дисперсии и нелинейности системы. Показано, что значительное влияние на эволюцию ПКИ оказывает величина спин-орбитального взаимодействия.

При этом актуальной проблемой является определение чистоты материала, который часто содержит различные включения, в том числе и наночастицы различных металлов (платины, золота, серебра и др.). Наночастицы обладают физическими и химическими свойствами, отличающимися от свойств материалов, из которых они получены. На сегодняшний день синтезировано большое количество наночастиц металлов и оксидов металлов, которые применяются в различных областях благодаря уникальным электрическим, магнитным, оптическим и каталитическим свойствам. Так, их можно использовать отдельно или в сочетании с другими наноструктурами в биосенсорах для усиления сигнала, повышения чувствительности, значительного улучшения обнаружения и количественного определения различных биомолекул [6]. Гибриды наночастиц благородных металлов и углеродных нанотрубок применяют в качестве электрокатализаторов топливных элементов [7]. Стоит отметить, что наличие таких примесей может приводить к изменению энергетического спектра углеродных наноструктур [8,9], а, следовательно, и их свойств, и в общем случае оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие. Этим и определяется важность исследования данного влияния на характеристики импульса.

Отметим и использование углеродных наноматериалов при разработке различных компонентов оптоэлектроники, в том числе сверхкомпактных оптоэлектронных фильтров [10], оптоэлектронных интегральных схем [11], фотонных излучателей [12] и др.

В настоящей работе изучается динамика лазерного импульса малой длительности из области инфракрасного диапазона при его взаимодействии с композитом из полимера и графеновых нанолент [13], содержащих металлические примеси. Для проведения расчетов используется ранее разработанная модель, которую необходимо модифицировать на случай содержания в среде полимеров.

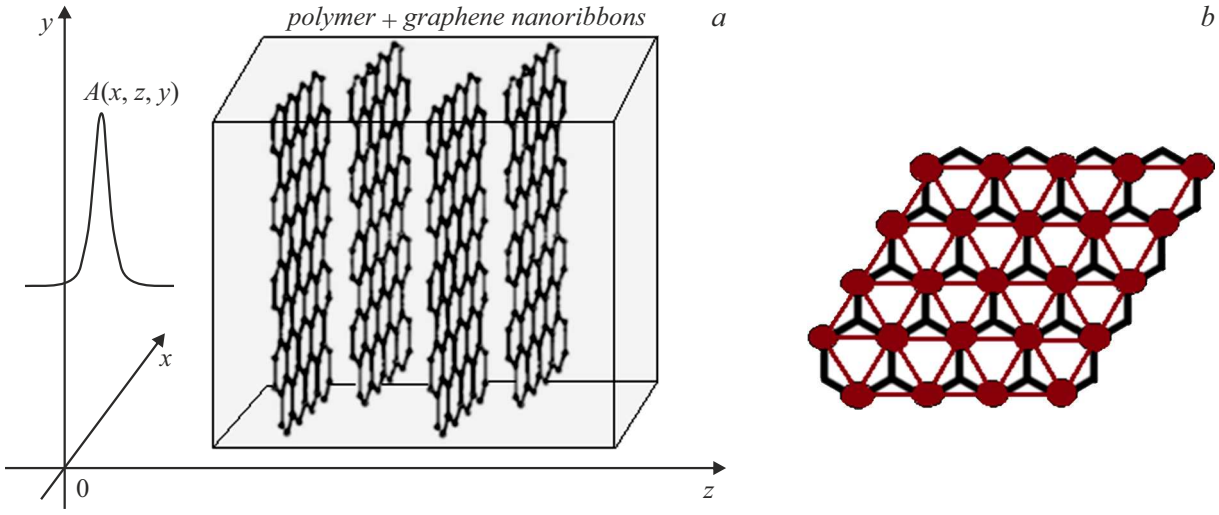


Рис. 1. *a* — схематичное изображение геометрии системы; *b* — фрагмент графеновой наноленты со слоем металлических частиц, показанных красными кружками (вид сверху), красные линии показывают связи между металлическими адатомами.

Наноленты представляют собой квазиодномерные материалы с сотовой структурой с шириной в несколько атомов [14]. С точки зрения приложений, в настоящее время существует множество способов, позволяющих успешно синтезировать большое количество двумерных монослойных материалов. На сегодняшний день детально исследованы различные виды нанолент, такие, как силиценовые, из нитрида бора, из оксида галлия, графеновые наноленты и многие другие. Нас будут интересовать графеновые наноленты [15], которые представляют собой монослой sp^2-гибридизированных атомов углерода, расположенных в двумерных решетках, имеющих соотношение сторон более ста, которые имеют значительные межфазные области, а также краевые области. Что касается методов получения графеновых нанолент, то можно выделить два основных подхода: метод „сверху вниз“ и метод „снизу вверх“, которые включают химические методы, метод плазменного травления, литографию и др. [16,17]. Также, помимо обработки графена, применяется разворачивание УНТ [18].

Графеновые наноленты используются во многих прикладных областях, но из-за того, что графен не имеет запрещенной зоны, его нельзя использовать в оптоэлектронных устройствах [19]. Одним из методов увеличения запрещенной зоны является легирование разного рода примесями, в том числе и металлическими.

Стоит отметить, что целесообразность использования композита обусловлена необходимостью получить заданную геометрию графеновых нанолент с определенной ориентацией и расстояниями между ними. Причем это может быть достигнуто как в процессе формирования композита, так и уже после добавления нанолент в полимерную матрицу с использованием внешних воздействий, таких, как электрические и магнитные поля, механические деформации типа сжатия и растяжения, а также катализаторов [20–23]. Во многих исследованиях показано, что графеновые наноленты могут быть выровнены в полимерной матрице при образовании композитов. Выявлено, что такие гибридные формы демонстрируют лучшие характеристики с точки зрения механической прочности, электропроводности, термической стабильности и реологических свойств.

Отметим также, что уже выполнены исследования эволюции электромагнитных импульсов в УНТ с полимерами в двумерном [24] и трехмерном случаях [25], в том числе и в тонких композитных пленках [26], но без учета металлических примесей. Поэтому в настоящей работе мы изучим эффекты, которые проявляются в поведении предельно короткого импульса, и к которым приводит наличие металлических наночастиц (атомы, адсорбированные на графеновой поверхности) в композите графеновых нанолент с полимером, а именно исследуем влияние металлических адатомов на характеристики импульса.

1. Модель и основные уравнения

Рассмотрим прохождение предельно короткого оптического импульса в среде с полимером, содержащим графеновые наноленты с границами типа „зигзаг“. При этом композитный материал помещается на пути лазерного импульса таким образом, чтобы вектор напряженности электрического поля (и векторный потенциал $\mathbf{A}(x, z, t)$) был направлен под углом 90° к плоскости нанолент — Oy, а волновой вектор ориентирован параллельно оси Oz (рис. 1). Отметим, что в нашей модели наноленты считаются однослойными. Такой вид удается получить, например, с помощью электронной литографии, когда графен разрезается на части [27] или из двухслойных УНТ, распаковка которых проводится при помощи ультразвуковой обработки [28]. Мы рассматриваем адсорбцию атомов никеля и меди на графе-

новой наноленте, металлические частицы представляют собой один слой плотноупакованных адатомов. Причем адатомы никеля сильно взаимодействуют с графеновой нанолентой (более сильная гибридизация), а меди — слабо. Структура нанолент — регулярная без деформаций, дефекты обусловлены наличием металлических примесей, что приводит к изменению параметров гамильтониана.

Гамильтониан, описывающий электронные свойства графеновой наноленты, имеет вид [29,30]:

$$H = H_{\text{kin}} + H_{\text{pot}} + H_{\text{int}} + H_{\text{R}}, \tag{1}$$

где H_{kin} — кинетическая энергия электронов, H_{pot} — потенциальная энергия, H_{int} — обменное взаимодействие, H_{R} — спин-орбитальное взаимодействие Рашбы. Ниже приводится вид составных частей гамильтониана:

$$\begin{aligned}
H_{\text{kin}} &= \hbar v_{\text{D}}(\tau k_x \sigma_x + k_y \sigma_y),\\
H_{\text{pot}} &= \Delta_{bg} \sigma_z s_0,\\
H_{\text{int}} &= \lambda_A \frac{\sigma_z + \sigma_0}{2} s_z + \lambda_B \frac{\sigma_z - \sigma_0}{2} s_z,\\
H_{\text{R}} &= \lambda_R(\tau \sigma_x s_y - \sigma_y s_x),
\end{aligned} \tag{2}$$

где k_x, k_y — компоненты электронной волновой функции, v_{D} — скорость электронов в окрестности точки Дирака, $\tau = \pm 1$ с учетом знака долины для точек Дирака, Δ_{bg} — полуширина запрещенной зоны, λ_A, λ_B — постоянные обменного взаимодействия для подрешеток A и B двумерного графенового листа, λ_{R} — константа спин-орбитального взаимодействия Рашбы, $\sigma_i\,(i = x, y, z)$, $s_i\,(i = x, y, z)$ — матрицы Паули в спиновом и решеточном пространствах, σ_0, s_0 — единичные матрицы в соответствующих пространствах.

Значения констант взаимодействия гамильтонианов H_{int} и H_{R}, а также Δ_{bg} выбирались для случая, когда металлический адатом располагается над атомом углерода подрешетки A. Поэтому связь с этой подрешеткой предполагается более сильной по сравнению с подрешеткой B. Известно, что константа спин-орбитального взаимодействия Рашбы для графеновой плоскости близка к нулю, но при наличии примесей появляется энергетическая щель в спектре, и λ_{R} существенно увеличивается [31].

Далее оператор полной энергии (1) представлялся в матричной форме:

$$\begin{aligned}
H &= \begin{pmatrix} \alpha & 0 & a & b \\ 0 & \beta & s & a \\ a^* & s^* & \gamma & 0 \\ b^* & a^* & 0 & \delta \end{pmatrix},\\
\alpha &= \Delta_{bg} + \lambda_A,\ \beta = \Delta_{bg} - \lambda_A,\\
\gamma &= -\Delta_{bg} - \lambda_B,\ \delta = -\Delta_{bg} - \lambda_B,\\
a &= \hbar v_{\text{D}}(\tau k_x - i k_y),\ b = i\lambda_{\text{R}}(1 - \tau),\\
s &= i\lambda_{\text{R}}(1 + \tau)
\end{aligned} \tag{3}$$

и решалась задача на собственные значения методом Декарта–Эйлера [32]:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{1,2,3,4} &= \sqrt{z_1} \pm \sqrt{z_2} \pm \sqrt{z_3},\\
z_i &= w_i - \frac{p}{6}, \quad w_1 = M_1 + M_2,\\
w_{2,3} &= -\frac{M_1 + M_2}{2} \pm i\sqrt{3}\,\frac{M_1 - M_2}{2},\\
M_1 &= \sqrt[3]{-0.5q_1 + \sqrt{Q_1}},\ M_2 = \sqrt[3]{-0.5q_1 - \sqrt{Q_1}},\\
Q_1 &= \left(\frac{p_1}{3}\right)^3 + \left(\frac{q_1}{2}\right)^2,\ p_1 = -\frac{p^2}{12} + \frac{p^2 - 4r}{16},\\
q_1 &= \frac{p}{6}\left(\frac{p^2}{18} - \frac{p^2 - 4r}{16}\right) - \frac{q^2}{64},\\
p &= -\frac{3F^2}{8} + B, \quad q = \frac{F^3}{8} - \frac{FB}{2} + C,\\
r &= -\frac{3F^4}{256} + \frac{F^2 B}{16} - \frac{FC}{4} + D,\\
F &= -(\alpha + \beta + \lambda + \delta),\\
B &= \alpha\beta + (\alpha + \beta)(\gamma + \delta) + \gamma\delta - 2|a|^2 - |b|^2 - |s|^2,\\
C &= -\alpha\beta(\gamma + \delta) - \gamma\delta(\alpha + \beta) + |s|^2(\alpha + \delta) + |b|^2(\beta + \gamma),\\
D &= \alpha\beta\gamma\delta - \alpha\gamma|a|^2 - \alpha\delta|s|^2 + |a|^4 - a^2 b^* s^*\\
&\quad - |a|^2\beta\delta - |b|^2\beta\gamma - (a^*)^2 bs + |b|^2|s|^2.
\end{aligned} \tag{4}$$

Уравнение, описывающее распространение предельно короткого импульса, можно записать в следующем виде:

$$\Delta\mathbf{A} - \frac{\varepsilon_m}{c^2}\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \frac{4\pi}{c}\mathbf{j}(\mathbf{A}) = 0. \tag{5}$$

Здесь $\mathbf{A}$ — векторный потенциал электрического поля, c — скорость света, ε_m — диэлектрическая проницаемость среды, $\mathbf{j}$ — плотность электрического тока, Δ — дифференциальный оператор Лапласа.

В настоящей работе мы рассматриваем двумерный случай, когда векторный потенциал имеет вид $\mathbf{A} = \big(0, A(x, z, t), 0\big)$, следовательно, и плотность тока будет иметь только одну ненулевую y-компоненту.

Далее учтем, что полимерная матрица представляет собой композит полимера с графеновыми нанолентами, поэтому плотность тока содержит две компоненты:

$$j(A) = j_1(A) + j_2(A), \tag{6}$$

где j_1, j_2 — вклады в электрический ток графеновых нанолент и полимеров соответственно.

В приближении низких температур выражение для плотности тока j_1 задается следующей формулой:

$$\begin{aligned}
j_1 &= e\int_{-h}^{h}\int_{-h}^{h} dp_x dp_y\, v_y\left(p_x, p_y - \frac{e}{c}A(x, z, t)\right),\\
v_y(p_x, p_y) &= \partial E(p_x, p_y)/\partial p_y,
\end{aligned} \tag{7}$$

где $v_y(p_x, p_y)$ — скорость электронов, p_x, p_y — компоненты импульса электрона, e — заряд электрона,

$E(p_x, p_y)$ — закон дисперсии электронов, определяемый согласно выражению (4).

Пределы интегрирования h по прямоугольной области определяются, исходя из равенства числа частиц, которое подчиняется распределению Ферми–Дирака:

$$\int_{-h}^{h}\int_{-h}^{h} dp_x dp_y = \iint_{1^{st}BZ} dp_x dp_y \langle a^{+}_{p_x,p_y}, a_{p_x,p_y}\rangle, \qquad (8)$$

где $1^{st}BZ$ обозначает первую зону Бриллюэна, $a^{+}_{p_x,p_y}$, a_{p_x,p_y} — операторы рождения, уничтожения электронов, $\langle \ldots \rangle$ — означают усреднение с оператором плотности.

Расчет второй компоненты плотности тока j_2 проводился аналогично расчету тока в системе квантовых точек, обладающих прыжковой проводимостью [33]. Подробно эта модель описана и обоснована для полиацетилена в работе [34]:

$$j_2 = e\gamma_0 \frac{3d}{2\hbar}\chi_{\text{pol}} \sin\left(\frac{a_{\text{POL}} eA}{c}\right), \qquad (9)$$

$\gamma_0 = 2.7\,\text{eV}$, $d = 0.142\,\text{nm}$, a_{POL} — длина углеродной связи в полимере, χ_{pol} — определяет концентраци электронов в полимере.

2. Результаты численного моделирования: двумерный случай

Полученное уравнение (5) с учетом (7) и (9) решалось при помощи конечно-разностного численного метода [35] с использованием стандартных условий устойчивости. Начальное условие для предельно короткого импульса, состоящего из одного колебания поля, задавалось в виде функции Гаусса:

$$A(x, z, 0) = Am \exp\left(-\frac{z^2}{\gamma_z^2}\right)\exp\left(-\frac{x^2}{\gamma_x^2}\right),$$

$$\frac{dA(x, z, 0)}{dt} = \frac{2Am\, z\, v_z}{\gamma_z^2}\exp\left(-\frac{z^2}{\gamma_z^2}\right)\exp\left(-\frac{x^2}{\gamma_x^2}\right). \qquad (10)$$

Здесь Am — амплитуда импульса, $v_z = 0.95c$ — его скорость в момент времени $t = 0$ (в единицах скорости света), γ_z, γ_x — определяют ширину импульса вдоль заданных направлений ($6\,\mu$m и $16.5\,\mu$m).

Численное моделирование проводилось при следующих параметрах: размеры полимерной (полиацетиленовой) матрицы $1 \times 1 \times 1$ cm, концентрация полимера около 75%, $z = 0$ соответствует его месторасположению (началу), а также месту входа импульса в композит, ширина графеновых нанолент около 20 nm, расстояние между ними $0.2\,\mu$m. Параметры гамильтониана в формуле (3) для наночастиц Ni: $\Delta_{bg} = 29.5\,\text{meV}$, $\lambda_{\text{R}} = 4.9\,\text{meV}$, $\lambda_A = 60.8\,\text{meV}$, $\lambda_B = 8.9\,\text{meV}$, для Cu — $\Delta_{bg} = 7.9\,\text{meV}$, $\lambda_{\text{R}} = 1.6\,\text{meV}$, $\lambda_A = 1.97\,\text{meV}$, $\lambda_B = 0.16\,\text{meV}$ [31]. Расстояние между слоем частиц и графеновой нанолентой: для Ni — 0.306 nm, для Cu — 0.312 nm. Напряженность электрического поля предельно короткого импульса в начальный момент времени (максимальное значение) — $5 \cdot 10^7$ V/m.

Интенсивность электрического поля импульса определяется по формуле

$$I \propto E^2,$$
$$E = -\frac{1}{c}\frac{\partial A}{\partial t}. \qquad (11)$$

На рис. 2 показано изменение интенсивности двумерного предельно короткого оптического импульса в ходе его прохождения через композит с графеновыми нанолентами и наночастицами никеля.

Согласно рис. 2, наблюдается достаточно локализованное движение импульса с сохранением пространственной формы. При этом наблюдается сильное искривление переднего фронта, а также образование нескольких пиков, следующих за главным.

На рис. 3 демонстрируются особенности, проявляющиеся в поведении предельно короткого оптического импульса, вызванные различным типом наночастиц.

Рис. 3 показывает, что форма импульса и кривизна фронта сильно зависят от наличия/отсутствия наночастиц. Стоит отметить, что тип металлической частицы в меньшей степени влияет на форму импульса, чем на величину его интенсивности.

Зависимость характеристик предельно короткого импульса от концентрации полимера представлена на рис. 4.

Согласно полученным зависимостям можно заключить, что увеличение концентрации полимера в композите приводит к более сильному расплыванию импульса по сравнению с распространением в среде, содержащей графеновые наноленты, вне полимерной матрицы. С одной стороны, использование полимера делает удобным работу с нанолентами, а с другой — приводит к более сильным изменениям характеристик импульса по сравнению с первоначальными параметрами. Поэтому данный эффект необходимо учитывать при изготовлении композитов.

3. Результаты численного моделирования: трехмерный случай

В этом случае волновое уравнение для векторного потенциала может быть записано в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\varepsilon_m}{c^2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial A}{\partial r}\right) - \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = \frac{4\pi}{c}\big(j_1(A) + j_2(A)\big),$$

$$r^2 = x^2 + y^2, \quad \varphi = \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right). \qquad (12)$$

Здесь векторный потенциал поля импульса задается следующим образом:

$$\mathbf{A} = \big(0, A(x^2 + y^2, z, t), 0\big).$$

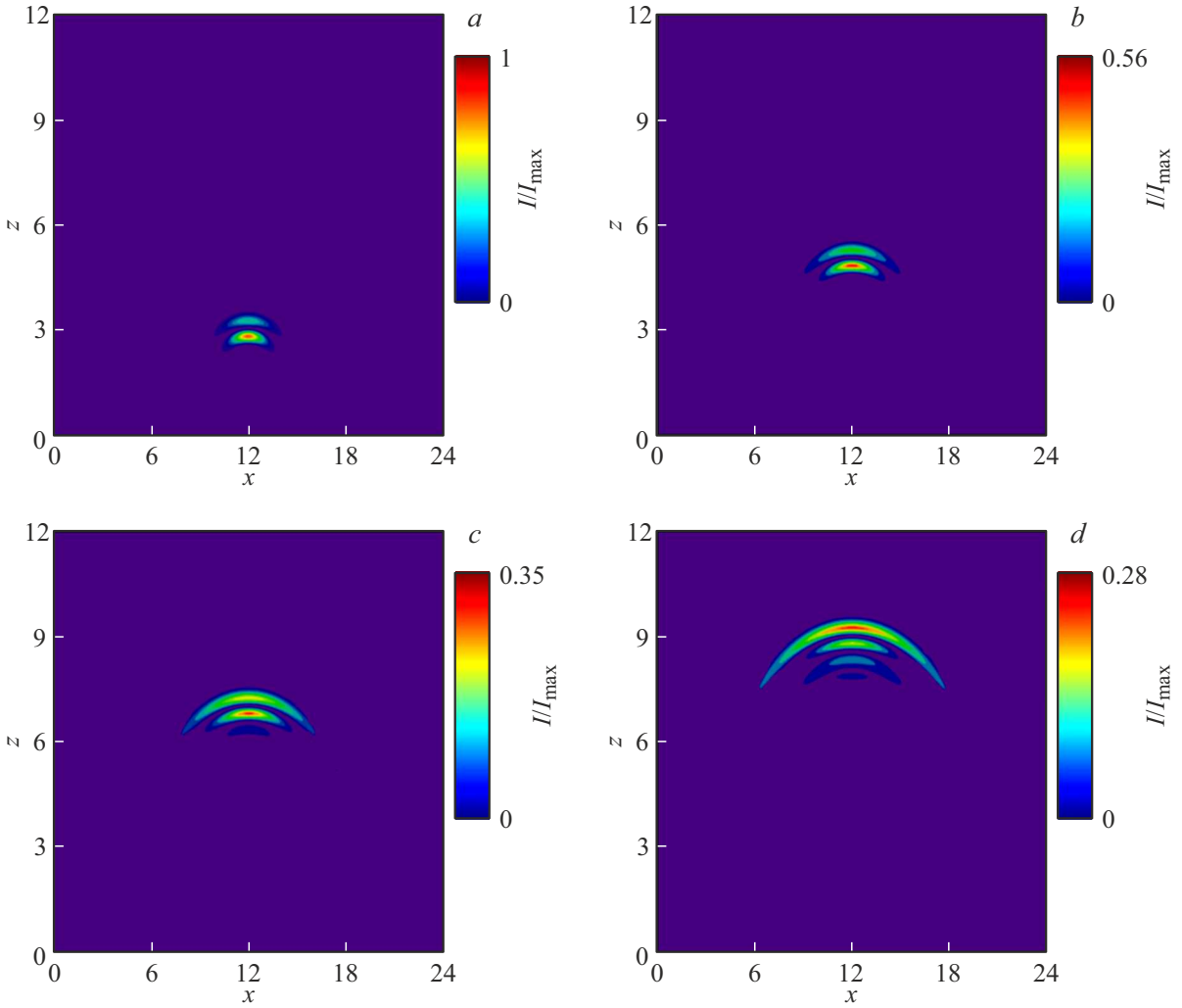


Рис. 2. Интенсивность электрического поля двумерного электромагнитного импульса в ходе его прохождения через композит с графеновыми нанолентами, содержащими наночастицы никеля, в различные моменты времени: *a* — $t = 3.0 \cdot 10^{-13}$ s; *b* — $t = 5.0 \cdot 10^{-13}$ s; *c* — $t = 7.0 \cdot 10^{-13}$ s; *d* — $t = 9.0 \cdot 10^{-13}$ s. Единицы по координатам соответствуют $2 \cdot 10^{-5}$ m. Цветовая шкала приведена для интенсивности, отнесенной к максимуму интенсивности для всех рисунков (*a*–*d*).

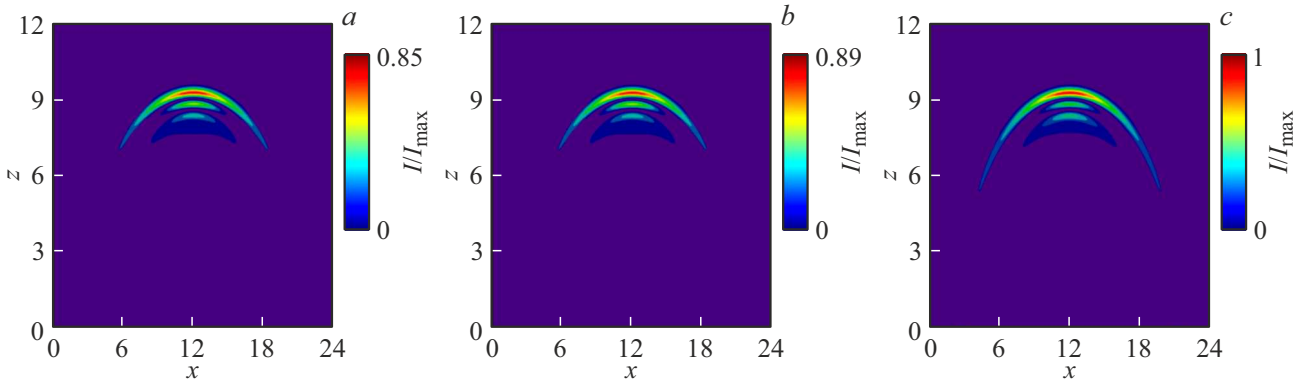


Рис. 3. Интенсивность электрического поля двумерного электромагнитного импульса в ходе его прохождения через композит с графеновыми нанолентами, содержащими наночастицы металла, в момент времени $t = 9.0 \cdot 10^{-13}$ s для разных наночастиц: *a* — Ni; *b* — Cu; *c* — УНТ без примесей. Единицы по координатам соответствуют $2 \cdot 10^{-5}$ m. Цветовая шкала приведена для интенсивности, отнесенной к максимуму из всех трех рисунков (*a*–*c*).

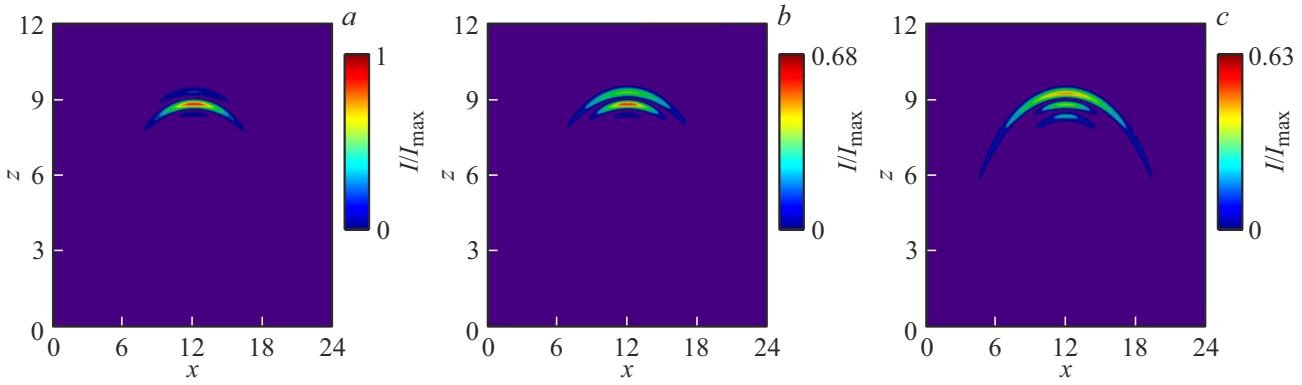


Рис. 4. Интенсивность электрического поля двумерного электромагнитного импульса в ходе его прохождения через композит с графеновыми нанолентами, содержащими наночастицы Ni, в момент времени $t = 9.0 \cdot 10^{-13}$ s для разной концентрации полимера: *a* — $\chi_{\text{pol}} = 0$; *b* — $\chi_{\text{pol}} = 0.5$; *c* — $\chi_{\text{pol}} = 0.8$. Единицы по координатам соответствуют $2 \cdot 10^{-5}$ m. Цветовая шкала приведена для интенсивности, отнесенной к максимуму интенсивности для значения $\chi_{\text{pol}} = 0$.

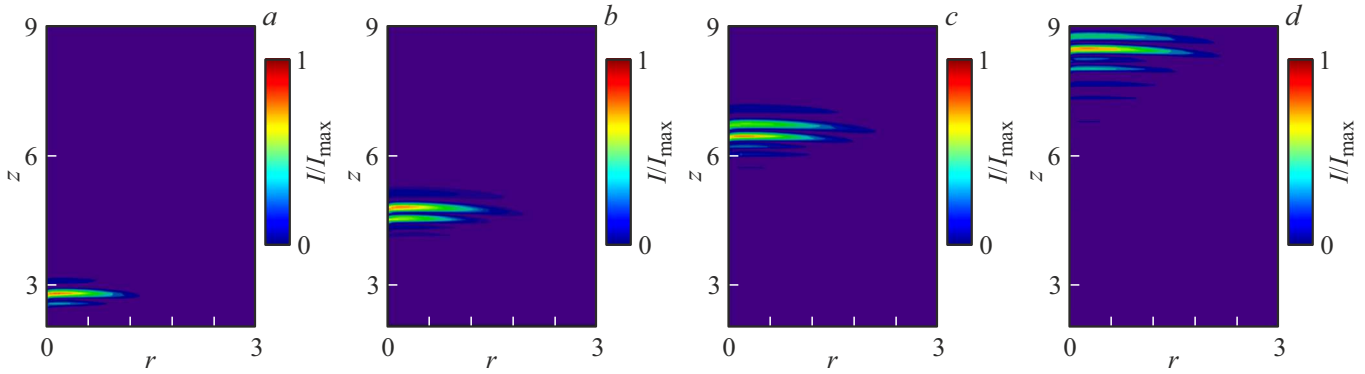


Рис. 5. Интенсивность электрического поля трехмерного электромагнитного импульса в ходе его прохождения через композит с графеновыми нанолентами, содержащими наночастицы никеля, в различные моменты времени: *a* — $t = 3.0 \cdot 10^{-13}$ s; *b* — $t = 5.0 \cdot 10^{-13}$ s; *c* — $t = 7.0 \cdot 10^{-13}$ s; *d* — $t = 9.0 \cdot 10^{-13}$ s. Единицы по координатам соответствуют $2 \cdot 10^{-5}$ m. Цветовая шкала приведена для интенсивности, отнесенной к максимуму значения интенсивности из всех рисунков (*a*–*d*).

Далее мы можем пренебречь третьим слагаемым в уравнении (12), содержащим вторую производную по углу φ, поскольку из-за малости накопленного заряда (согласно оценкам, выполненным в ранних исследованиях, можно заключить, что доля накопленного заряда не превышает 2% от общего вклада в величину тока) обеспечивается цилиндрическая симметрия электрического поля импульса [36].

Начальное условие выбиралось аналогично двумерному случаю с учетом перехода в цилиндрическую систему координат:

$$A(r^2, z, 0) = Am \exp\left(-\frac{z^2}{\gamma_z^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\gamma_r^2}\right),$$

$$\frac{dA(r^2, z, 0)}{dt} = \frac{2Am z v_z}{\gamma_z^2} \exp\left(-\frac{z^2}{\gamma_z^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\gamma_r^2}\right), \quad (13)$$

где $\gamma_z = 3\,\mu$m, $\gamma_r = 6\,\mu$m — ширина импульса вдоль координаты r.

Динамика изменения интенсивности трехмерного предельно короткого электромагнитного импульса представлена на рис. 5.

Как показано на рис. 5, импульс распространяется по образцу, испытывая уширение и уменьшение амплитуды вследствие появления несколько отличающихся по величине пиков, как и в 2*D*-случае. При этом искривление переднего фронта не наблюдается.

Также были исследованы характеристики импульса для гибридов с различными наночастицами и без них. Обнаружено, что в полимерном композите в сочетании с наночастицами металлов обеспечивается более локализованное распространение трехмерного импульса по сравнению с отсутствием такого сочетания. Увеличение концентрации полимера сказывается на величине „хвоста“, следующего за импульсом. Чем больше графеновых нанолент в композите, тем меньше „хвост“.

Заключение

1. Построена модель, описывающая воздействие металлических наночастиц на динамику 2*D*- и 3*D*-электромагнитных импульсов, распространяющихся в полимерном композите с графеновыми нанолентами.

2. Показано, что по пространственно-энергетическим характеристикам импульса можно обнаружить присутствие металлических наночастиц в графеновых нанолентах в составе композитного материала.

3. Обнаружено, что доля полимера, составляющего композит, имеет большое влияние на динамику предельно короткого оптического импульса. Причем в случае двумерного импульса фронт импульса искривляется сильнее с ее увеличением. В то же время введение металлических наночастиц в полимерный композит с графеновыми нанолентами позволяет ослабить этот эффект.

4. Выявлено, что изменение доли полимера в композите для трехмерного предельно короткого оптического импульса позволяет управлять величиной „хвоста“, движущегося за основным импульсом.

Благодарности

Автор выражает благодарность профессору М.Б. Белоненко за многолетнюю поддержку, обсуждение и полезные советы.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] П. Харрис. *Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века* (Техносфера, М., 2003)

[2] N.N. Konobeeva, E.G. Fedorov, N.N. Rosanov, A.V. Zhukov, R. Bouffanais, J. Appl. Phys., **126**, 203103 (2019). DOI: 10.1063/1.5128365

[3] A. Molle, C. Grazianetti, L. Tao, D. Taneja, Md.H. Alam, D. Akinwande. Chem. Soc. Rev., **47**, 6370 (2018). DOI: 10.1039/C8CS00338F

[4] A.V. Zhukov, R. Bouffanais, N.N. Konobeeva, M.B. Belonenko. Phys. Lett. A, **380** (38), 3117 (2016). DOI: 10.1016/j.physleta.2016.07.021

[5] Н.Н. Конобеева, М.Б. Белоненко. Письма в ЖТФ, **43** (8), 48 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.08.44534.16316 [N.N. Konobeeva, M.B. Belonenko. Tech. Phys. Lett., **43** (4), 386 (2017). DOI: 10.1134/S106378501704023X]

[6] S. Malik, J. Singh, R. Goyat, Ya. Saharan, V. Chaudhry, A. Umar, A.A. Ibrahim, S. Akbar, S. Ameen, S. Baskoutas. Heliyon, **9** (9), e19929 (2023). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19929

[7] Q.T. Phan, K.Ch. Poon, H. Sato. Intern. J. Hydrogen Energy, **46** (27), 14190 (2021). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.006

[8] L. Shang, T. Bian, B. Zhang, D. Zhang, L.Z. Wu, C.H. Tung, Y. Yin, T. Zhang, Angew. Chem., **53**, 250 (2014). DOI: 10.1002/anie.201306863

[9] J. Huang, L. Zhang, B. Chen, N. Ji, F. Chen, Y. Zhang, Z. Zhang. Nanoscale, **2**, 2733 (2010). DOI: 10.1039/C0NR00473A

[10] A. Tavousi, M.A. Mansouri-Birjandi, M. Janfaza. Appl. Opt., **57** (20), 5800 (2018). DOI: 10.1364/AO.57.005800

[11] Y. Liu, S. Wang, H. Liu, L.-M. Peng. Nature Commun., **8**, Art. N 15649 (2017). DOI: 10.1038/ncomms15649

[12] Y. Wang, G. Sun, X. Zhang, X. Zhang, Z. Cui. Adv. Electronic Mater., **10** (10), 2400124 (2024). DOI: 10.1002/aelm.202400124

[13] S. Majumder, A. Meher, S. Moharana, K.H. Kim. Carbon, **216**, 118558 (2024). DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118558

[14] C. Tian, W. Miao, L. Zhao, J. Wang. Rev. Phys., **10**, Art. N 100082 (2023). DOI: 10.1016/j.revip.2023.100082

[15] A.P. Johnson, C. Sabu, N.K. Swamy, A. Anto, H.V. Gangadharappa, K. Pramod. Biosens. Bioelectron., **184**, Art. N 113245 (2021). DOI: 10.1016/j.bios.2021.113245

[16] P.V. Fedotov, D.V. Rybkovskiy, I.V. Novikov, E.D. Obraztsova. Phys. Status Solidi, **259**, Art. N 2100501 (2022). DOI: 10.1002/pssb.202100501

[17] S. Jeon, P. Han, J. Jeong, W.S. Hwang, S.W. Hong. Nanomaterials, **11** (1), 33 (2021). DOI: 10.3390/nano11010033

[18] Z. Zhang, A. Fraser, S. Ye, G. Merle, J. Barralet. Nano Futur, **3**, Art. N 42003 (2019). DOI: 10.1088/2399-1984/ab4eff

[19] A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres, K.S. Novoselov, A.K. Geim. Rev. Mod. Phys., **81**, 109 (2009). DOI: 10.1103/RevModPhys.81.109

[20] R.J. Castellano, C. Aki, G. Giraldo, S. Kim, F. Fornasiero, J.W. Shan. J. Appl. Phys., **117**, 214306 (2015). DOI: 10.1063/1.4921948

[21] F. Bondino, E. Magnano, R. Ciancio, C. Castellarin Cudia, A. Barla, E. Carlino, F. Yakhou-Harris, N. Rupesinghe, C. Cepek. Phys. Chem. Chem. Phys., **19**, 32079 (2017). DOI: 10.1039/C7CP05181F

[22] D. Ürk, F.Ç. Cebeci, M.L. Öveçoğlu, H. Cebeci. Mater. Adv., **2**, 2021 (2021). DOI: 10.1039/D0MA00826E

[23] C. Zamora-Ledezma, C. Blanc, E. Anglaret. J. Phys. Chem., **116**, 13760 (2012). DOI: 10.1021/jp212113b

[24] N.N. Konobeeva. Optik, **157**, 521 (2018). DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.11.133

[25] Е.Н. Галкина, М.Б. Белоненко. Опт. и спектр., **129** (10), 1280 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.10.51494.1838-21 [E.N. Galkina, M.B. Belonenko. Opt. Spectr., **129** (10), 1280 (2021). DOI: 10.21883/EOS.2022.13.53983.1838-21]

[26] S.V. Belibikhin, N.N. Konobeeva. Nanosystems: Phys., Chem., Mathem., **15** (1), 60 (2024). DOI: 10.17586/2220-8054-2024-15-1-60-64

[27] П.Б. Сорокин, Л.А. Чернозатонский. УФН, **183**, 113 (2013). DOI: 10.3367/UFNr.0183.201302a.0113 [P.B. Sorokin, L.A. Chernozatonskii. Phys.-Usp., **56** (2), 105 (2013). DOI: 10.3367/UFNe.0183.201302a.0113]

[28] H. Tanaka, R. Arima, M. Fukumori, D. Tanaka, R. Negishi, Y. Kobayashi, S. Kasai, T.K. Yamada, T. Ogawa. Sci. Reports, **5**, Art. N 12341 (2015). DOI: 10.1038/srep12341

[29] K. Zollner, M. Gmitra, T. Frank, J. Fabian. Phys. Rev. B, **94**, 155441 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.94.155441

[30] A. Dyrda, J. Barnás. 2*D* Materials, **4**, 034003 (2017). DOI: 10.1088/2053-1583/aa7bac

[31] M. Wawrzyniak-Adamczewska. Electron. Struct., **1**, 015006 (2019). DOI: 10.1088/2516-1075/aade6

[32] Г.А. Корн, Т.М. Корн. *Справочник по математике (для научных работников и инженеров*) (Наука, М., 1974), с. 43–45.
[33] Ф.Г. Басс, А.А. Булгаков, А.П. Тетервов. *Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками* (Наука, М., 1989)
[34] В.А. Осипов, В.К. Федянин. *Рассеяние света на солитонах в полиацетилене* (ОИЯИ, Дубна, 1984)
[35] J.W. Thomas. *Numerical partial differential equations-finite difference methods* (Springer-Verlag, NY., 1995)
[36] A.V. Zhukov, R. Bouffanais, E.G. Fedorov, M.B. Belonenko. J. Appl. Phys., **114**, 143106 (2013). DOI: 10.1063/1.4824370