

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОМПЛЕКСНОГО
КОЭФФИЦИЕНТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ВОЛНОВЕДУЩЕЙ
СТРУКТУРЕ «УГЛЕРОДНАЯ НАНОТРУБКА – ГРАФЕН»
В ТЕРАГЕРЦОВОМ И ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ¹**

Аннотация.

Актуальность и цели. Углеродные наноструктуры, состоящие из углеродных нанотрубок (УНТ) и монослоев графена, обладают уникальными электронными, оптическими и механическими свойствами для создания линий передачи и устройств на графеновой платформе в терагерцовом и инфракрасном диапазонах. Целью данной работы является теоретическое исследование процесса распространения электромагнитных волн в нового класса волноводящих 2D-структурах на основе УНТ и графена в терагерцовом и ближнем инфракрасном диапазонах на основе математического моделирования, базирующегося на решении уравнений Максвелла совместно с материальными уравнениями сред (УНТ и графена).

Материалы и методы. Разработана математическая модель распространения электромагнитных волн и их взаимодействия с волноводящими 2D-структурами на основе УНТ и графена, базирующаяся на решении краевой задачи для уравнений Максвелла, где поверхностная проводимость графена включена как параметр и определяется формулой Кубо, используя разработанный вычислительный алгоритм на основе автономных блоков с каналами Флоке.

Результаты. Получены результаты электродинамического расчета действительной и мнимой частей комплексного коэффициента распространения, а также коэффициента замедления и затухания на длине волны фундаментальной моды в волноводящих структурах (УНТ – монослой графена) в зависимости от частоты при различных значениях химического потенциала (напряженности внешнего постоянного электрического поля) в терагерцовом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Выводы. Показано, что дисперсионные характеристики электромагнитных волн в волноводящих структурах УНТ–графен зависят от соотношения геометрических размеров (радиуса УНТ и расстояния УНТ–графен) и управляются действием внешнего электрического поля в терагерцовом, ближнем инфракрасном диапазонах.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, монослой графена, комплексный коэффициент распространения, химический потенциал, терагерц, ближний инфракрасный диапазон.

G. S. Makeeva, O. A. Golovanov

**ELECTRODYNAMIC CALCULATION OF A COMPLEX
COEFFICIENT OF ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION
IN THE WAVEGUIDING STRUCTURE “CARBON NANOTUBE -
GRAPHENE” IN TERAHERTZ AND INFRARED RANGES**

¹ Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 12-02-97025-р_поволжье_a.

Abstract.

Background. Carbon nanostructures, consisting of carbon nanotubes (CNTs) and graphene monolayers, have unique optical, electronic and mechanic properties for developing of waveguiding 2D structures and graphene-based devices at terahertz (THz) and infrared (IR) frequency ranges. The aim of the present work is to theoretically research propagation of electromagnetic waves in novel waveguiding 2D structures based on CNT- graphene at THz and near IR frequencies using mathematical modeling by solving the Maxwell's equations, complemented by the constitutive laws for CNTs and graphene.

Materials and methods. A mathematical model of propagation and interaction of electromagnetic waves in waveguiding 2D structures based on CNT- graphene was developed by solving the Maxwell boundary value problem, where the graphene electron surface conductivity is included as a parameter and determined from the Kubo formalism, using a computational algorithm on autonomous blocks with Floquet channels (FABs).

Results. The results of electrodynamic calculation of the real and imaginary parts of complex wave numbers and coefficients of delay and extinction of the fundamental mode in waveguiding 2D structures based on CNT- graphene depending on the frequency were obtained for different values of the chemical potential (the external electric field intensity) at THz and near IR frequency ranges.

Conclusions. It is shown that the dispersion performances of electromagnetic waves in waveguiding 2D structures based on CNT- graphene depend on the geometry sizes (the CNT radius and the distance between CNT and graphene) and can be tuned by the external electric field at THz and near IR frequencies.

Key words: carbon nanotubes, graphene monolayer, complex wave number, chemical potential, terahertz, near infrared frequency range.

Введение

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются уникальными одномерными системами, которые можно рассматривать как свернутые монослои графита [1–6]. Диаметр обычно колеблется в диапазоне 0,4–40 нм, но длина может отличаться в ~ 10000 раз и достигать 4 см. Отношение длины к диаметру УНТ может быть необычайно высоким, порядка $2,8 \cdot 10^7$. Это является причиной того, что все свойства УНТ по сравнению с типичными материалами являются чрезвычайно анизотропными и могут быть направленным образом варьируемыми.

Основная классификация УНТ проводится по количеству составляющих их слоев: однослойные, двухслойные, многослойные, тонкие УНТ. Однослойные УНТ – простейший вид нанотрубок. Эти УНТ имеют диаметр около 1 нм при длине, которая может быть во много тысяч раз больше [4]. Структуру однослойных УНТ можно представить как «обертывание» гексагональной сетки графита, основу которой составляют шестиугольники с расположенными в вершинах углов атомами углерода, в бесшовный цилиндр (рис. 1).

Многослойные УНТ состоят из нескольких слоев графита, сложенных в форме трубки. Расстояние между слоями равно 0,34 нм, т.е. такое же, как и между слоями в кристаллическом графите. Существуют две модели, используемые для описания их структуры [4]. Многослойные УНТ могут представлять собой несколько однослойных УНТ телескопического вида,

т.е. вложенных одна в другую (рис. 2) или, в другом случае, один монослой графена оборачивается несколько раз.

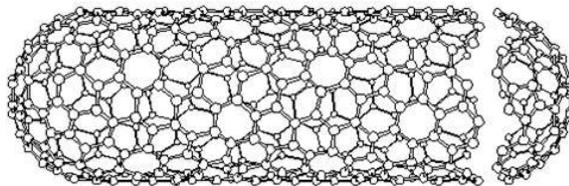


Рис. 1 Однослойные углеродные нанотрубки [4]



Рис. 2 Многослойные углеродные нанотрубки [4]

Эксперименты показывают, что материалы на основе УНТ являются очень прочными и жесткими с высокими пределом прочности на растяжение [4]. Это связано с совершенством структуры и сильной химической sp^2 -связью между атомами углерода, составляющими УНТ. При растягивающих нагрузках, превышающих некоторое критическое значение УНТ, испытывают пластическую деформацию.

Нанокompозиты на основе углеродных наноструктур, состоящих из набора вертикально ориентированных УНТ и монослоев графена, расположенных в верхней части решетки (рис. 3), были получены методом химического осаждения газа с использованием высокотемпературного каталитического пиролиза смеси ксилол-ферроцен [5]. Сканирующий электронный микроскопический анализ позволил установить особенности наноструктурной морфологии УНТ–графен, в частности, строение внутреннего слоя структуры монослоев графена и его связи с основной решеткой УНТ.

В синтезированной структуре (рис. 4) в 2D-плоскостях, перпендикулярных оси УНТ, практически полностью отсутствует тепло- и электропроводность. С другой стороны, графен обладает тепло- и электропроводностью в плоскости листа. В результате композитная структура имеет электрическую проводимость и тепловое рассеяние во всех направлениях [6].

Кроме того, монослой графена ограничивает длину УНТ, делая их практически однородными по длине. Нанокompозит легко растягивается

и гнется, при изгибе электрическое сопротивление материала увеличивается, но затем восстанавливается практически до начального состояния – после 1000 циклов сгибания/разгибания оно увеличивается на 1 %.

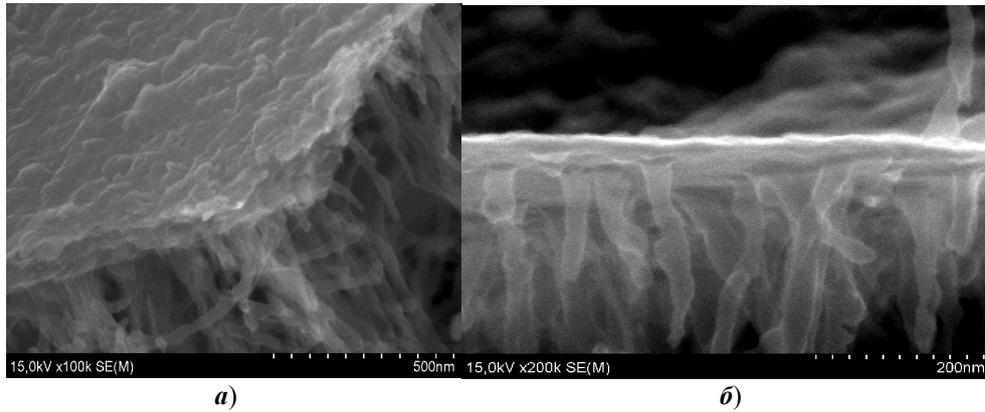


Рис. 3. Изображение в сканирующем электронном микроскопе нанокompозита на основе УНТ – монослои графена: *a* – плоский слой графена; *б* – переход УНТ–графен [5]

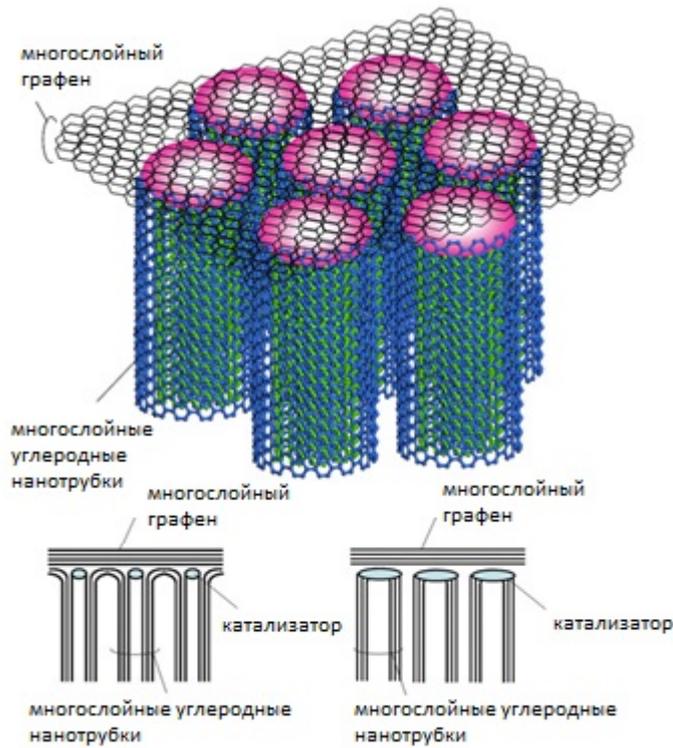


Рис. 4. Структура нанокompозита – УНТ, соединенные с монослоями графена [6]

Как следует из обзора источников [1–6], углеродные наноструктуры, состоящие из УНТ и монослоев графена, обладают уникальными электронными, оптическими и механическими свойствами для создания линий пере-

дачи и устройств на графеновой платформе в терагерцовом (ТГц) и инфракрасном (ИК) диапазонах.

Целью данной работы является теоретическое исследование процесса распространения электромагнитных волн в волноведущих 2D-структурах на основе графена и УНТ в ТГц- и ближнем ИК-диапазонах на основе математического моделирования, базирующегося на решении уравнений Максвелла, совместно с материальными уравнениями сред (углеродных наноструктур – графена и УНТ).

1. Математическая модель

Математическая модель распространения электромагнитных волн в электродинамических структурах на основе УНТ и графена базируется на решении краевой задачи для системы уравнений Максвелла

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}(t) &= \frac{\partial \vec{D}(t)}{\partial t} + \vec{J}(t), \\ \operatorname{rot} \vec{E}(t) &= -\frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{D}(t) &= \rho, \quad \operatorname{div} \vec{B}(t) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

совместно с материальными уравнениями среды (графена, УНТ)

$$\begin{aligned} \vec{D}(t) &= \epsilon_0 \epsilon \vec{E}(t), \\ \vec{B}(t) &= \mu_0 \mu \vec{H}(t), \\ \vec{J}(t) &= \sigma \vec{E}(t) \end{aligned}$$

и дополненной электродинамическими граничными условиями. Здесь $\vec{E}(t), \vec{H}(t)$ – векторы напряженностей электрического и магнитного полей; $\vec{D}(t), \vec{B}(t)$ – векторы электрической и магнитной индукций; $\vec{J}(t)$ – плотность тока; ϵ, μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; σ – объемная удельная проводимость (электропроводность) среды (графена, УНТ); ρ – объемная плотность электрического заряда; ϵ_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные.

Монослой графена характеризуется поверхностной проводимостью σ_s , определяемой формулой Кубо [7]:

$$\begin{aligned} \sigma_s(\omega, \mu_c) &= \frac{-ie^2 k_b T}{\pi \hbar^2 (\omega - i2\Gamma)} \left(\frac{\mu_c}{k_b T} + 2 \ln \left(\exp \left(\frac{-\mu_c}{k_b T} \right) + 1 \right) \right) - \\ &- \frac{ie^2 (\omega - i2\Gamma)}{\pi \hbar^2} \int_0^\infty \frac{\left(\exp \left(\frac{-\xi - \mu_c}{k_b T} \right) + 1 \right)^{-1} - \left(\exp \left(\frac{\xi - \mu_c}{k_b T} \right) + 1 \right)^{-1}}{(\omega - i2\Gamma)^2 - \left(\frac{2\xi}{\hbar} \right)^2} d\xi, \end{aligned} \quad (2)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ К – заряд электрона; $k_b = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $T = 300$ К – температура; $\Gamma = 10^{12}$ 1/с – скорость релаксации; $\mu_c = 0 - 1$ эВ – химический потенциал ($1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж); $\omega = 2\pi f$ – частота.

Углеродные нанотрубки характеризуются поверхностной проводимостью, определяемой формулой [7]:

$$\sigma_{zz}(\omega) = \frac{-i4e^2V_F}{\pi\hbar r(\omega - i\nu)}, \quad (3)$$

где $V_F = 3\gamma_0 b\pi / \hbar$, $\gamma_0 = 2,7$ эВ, $b = 0,142$; $\nu = 6T / r$, r – радиус УНТ.

В уравнения Максвелла (1) входит объемная удельная проводимость σ углеродной наноструктуры (графена, УНТ), которую необходимо выразить через поверхностную проводимость.

Введем эффективную толщину графена $d = 1 \cdot 10^{-9}$ м и установим связь между поверхностной σ_s и объемной σ проводимостями: $\sigma = \sigma_s / d$.

Для монослоя графена вводится комплексная диэлектрическая проницаемость [7]:

$$\varepsilon(\omega, \mu_c) = 1 + \frac{i\sigma(\omega, \mu_c)}{\varepsilon_0 \omega d},$$

где d – эффективная толщина монослоя графена.

Установим связь между поверхностной проводимостью УНТ σ_{zz} (3) и объемной удельной проводимостью УНТ σ :

$$\sigma = \sigma_{zz} / d,$$

где d – толщина стенки УНТ, и введем для УНТ комплексную диэлектрическую проницаемость:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{i\sigma_{zz}(\omega)}{\varepsilon_0 \omega d}. \quad (4)$$

Тогда уравнения Максвелла (1) для электродинамических структур на основе графена, УНТ запишутся для гармонических колебаний в виде

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{H} &= i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_b(\omega, \mu_c) \vec{E}, \\ \text{rot } \vec{E} &= -i\omega \mu_0 \mu_b \vec{H}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_b$, $\mu = \mu_b$ – диэлектрическая и магнитная проницаемости графена и УНТ, которые считаем скалярными величинами.

2. Проводимость углеродных нанотрубок в ТГц- и ближнем ИК-диапазонах

Для электродинамического расчета линии передачи УНТ–графен предварительно рассчитана поверхностная проводимость УНТ по формуле (4). Ре-

зультаты расчета частотной зависимости действительной и мнимой частей поверхностной проводимости σ_{zz} УНТ при различных радиусах УНТ в СВЧ, ТГц-диапазоне приведены на рис. 5.

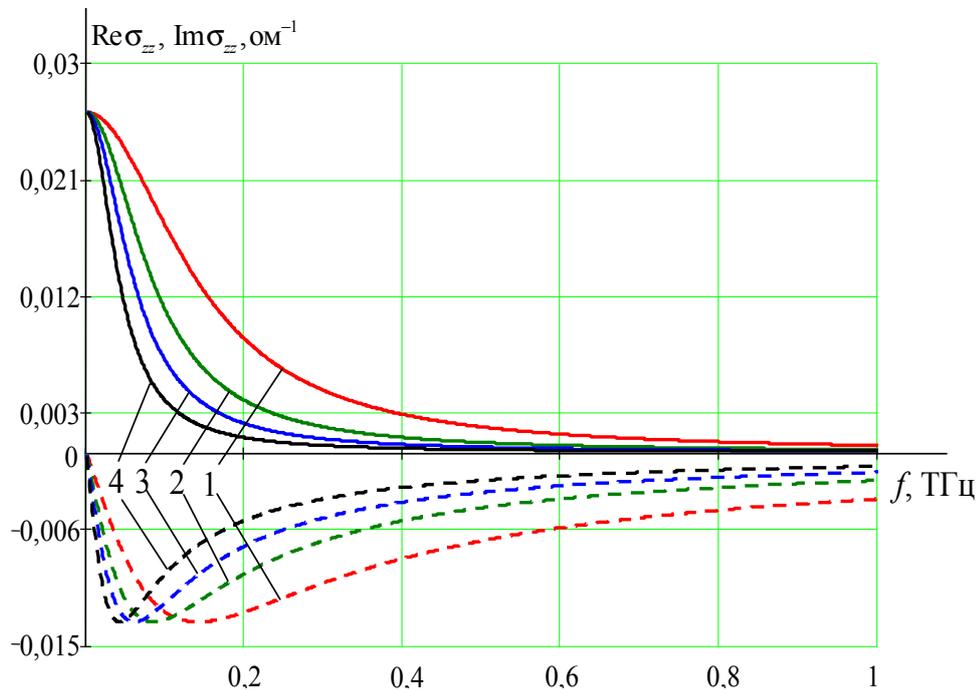


Рис. 5. Частотная зависимость действительной и мнимой частей поверхностной проводимости УНТ σ_{zz} в СВЧ- и ТГц-диапазоне при различных радиусах УНТ; кривые: 1 – $r = 2,03$ нм; 2 – $r = 3,39$ нм; 3 – $r = 4,74$ нм; 4 – $r = 6,8$ нм; сплошные кривые – $\text{Re } \sigma_{zz}$, пунктирные – $\text{Im } \sigma_{zz}$

Результаты расчета частотной зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости УНТ в ближнем ИК-диапазоне приведены на рис. 6. Результаты расчета частотной зависимости действительной и мнимой частей объемной удельной проводимости УНТ в СВЧ, ТГц- и ближнем ИК-диапазонах приведены на рис. 7.

3. Результаты электродинамического расчета комплексного коэффициента распространения электромагнитных волн в линии передачи УНТ–графен в ТГц- и ближнем ИК-диапазоне

Вычислительный метод математического моделирования базируется на декомпозиции анизотропных наноструктурных наноматериалов и волноведущих структур на основе графена и УНТ на автономные блоки в виде прямоугольных параллелепипедов, содержащих УНТ, графен, и с виртуальными каналами Флоке на гранях (ФАБ) [8]. Расчетная модель на основе ФАБ линии передачи УНТ–графен представлена на рис. 8.

Для построения дескрипторов (матрицы проводимости Y) ФАБ, содержащих УНТ и графен, разработан вычислительный алгоритм решения краевой 3D-задачи дифракции проекционным методом Галеркина [9].

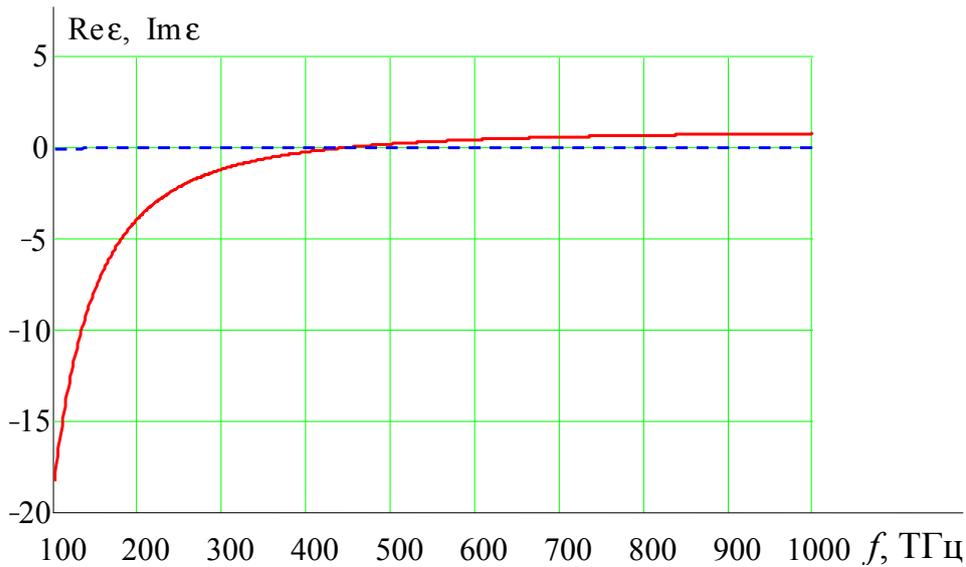


Рис. 6. Частотная зависимость действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости УНТ в ближнем ИК-диапазоне: $r = 1,4$ нм, $d = 0,5$ нм; сплошная кривая – $\text{Re } \epsilon$, пунктирная – $\text{Im } \epsilon$

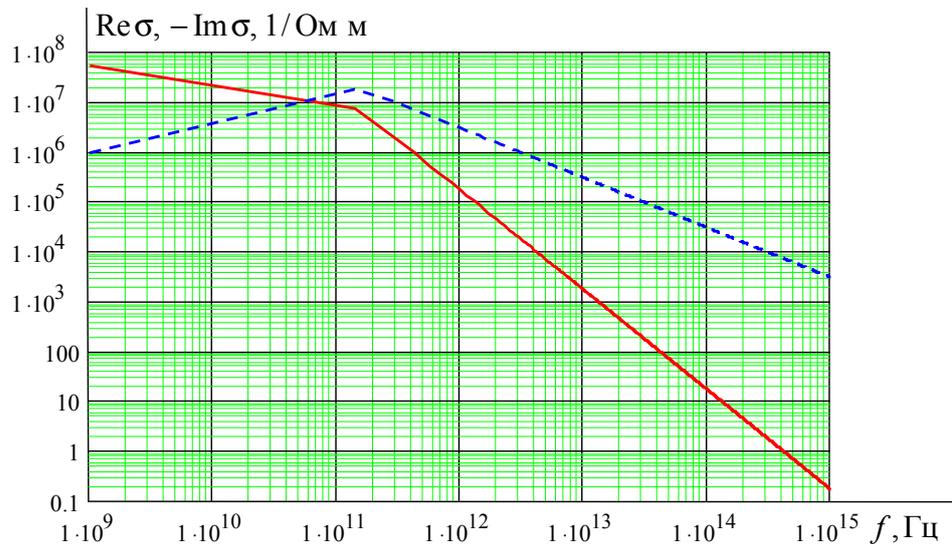


Рис. 7. Частотная зависимость действительной и мнимой частей объемной удельной проводимости УНТ в СВЧ, ТГц- и ближнем ИК-диапазонах: $r = 5,0$ нм, $d = 0,5$ нм; сплошная кривая – $\text{Re } \sigma$, пунктирная – $\text{Im } \sigma$

Математическая модель распространения электромагнитных волн в анизотропных наноструктурных материалах на основе графена и УНТ и волноведущих структурах УНТ–графен базируется на решении характеристического уравнения для определения постоянных распространения волн, включающего матрицу проводимости \mathbf{Y} (дескриптор) ФАБ [9].

С использованием разработанного вычислительного алгоритма расчета матрицы проводимости \mathbf{Y} ФАБ из характеристического уравнения [9] рассчи-

таны действительная и мнимая части комплексного коэффициента распространения фундаментальной моды в волноведущей структуре УНТ–графен в ТГц-диапазоне в зависимости от значения химического потенциала (величины внешнего постоянного электрического поля), а также соотношения геометрических размеров (при различных радиусах УНТ и расстояниях УНТ–графен).

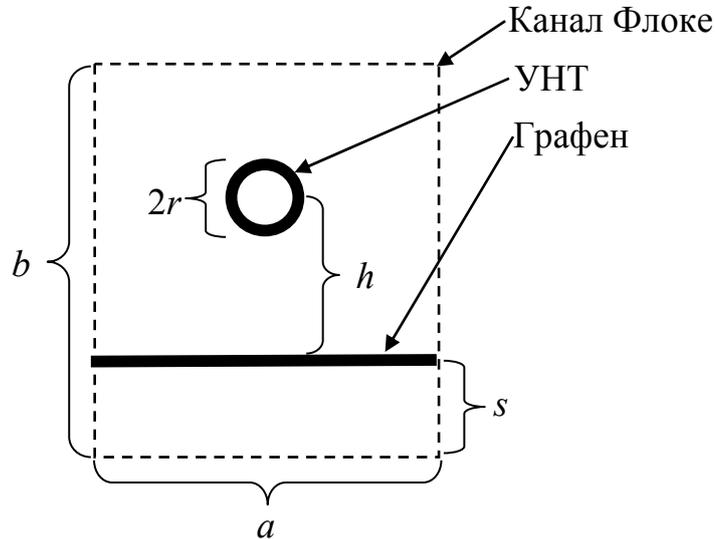


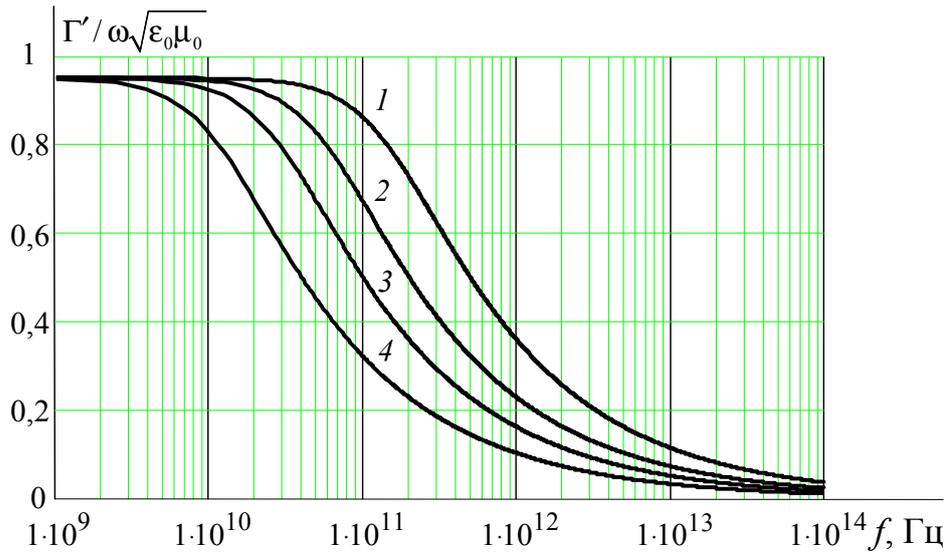
Рис. 8. Расчетная модель на основе ФАБ линии передачи УНТ–графен
 $a = b$ – размеры канала Флоке, $2r$ – диаметр УНТ, h – высота УНТ над графеном, s – толщина диэлектрика

Результаты электродинамического расчета частотных зависимостей относительной постоянной распространения $\Gamma' / \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ и коэффициента затухания Γ'' , дБ/м, электромагнитной волны основного типа в ТГц-диапазоне при различных радиусах УНТ представлены на рис. 9.

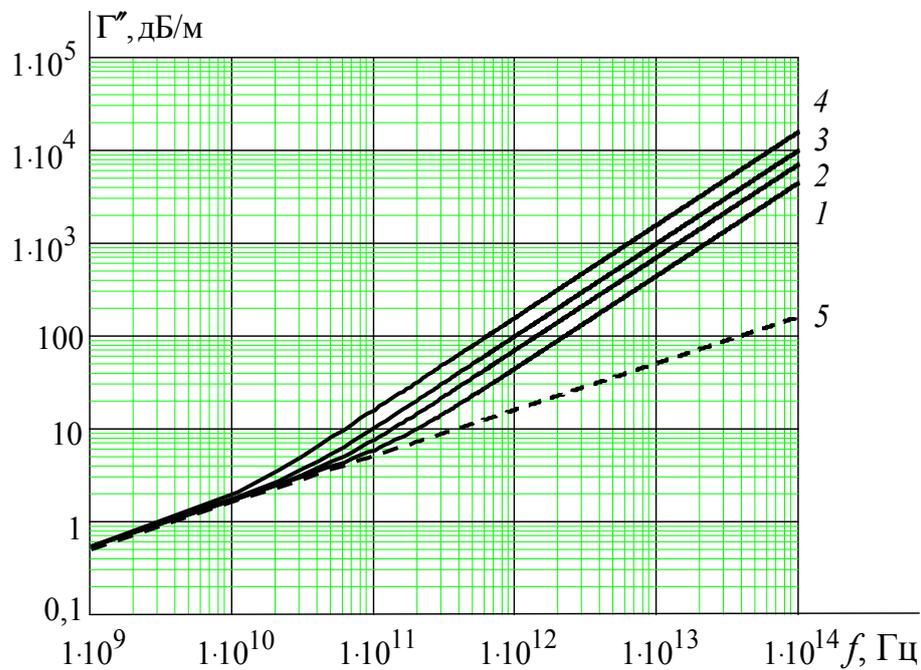
Как следует из результатов математического моделирования (рис. 9), при увеличении радиуса УНТ (2–25 нм) относительная постоянная распространения $\Gamma' / \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ и коэффициент затухания Γ'' (дБ/м) фундаментальной моды в волноведущей структуре УНТ–графен монотонно возрастают в ТГц-диапазоне.

Результаты электродинамического расчета частотных зависимостей относительной постоянной распространения $\Gamma' / \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ и коэффициента затухания Γ'' (дБ/м) электромагнитной волны основного типа в волноведущей структуре УНТ–графен в ТГц-диапазоне при различных значениях химического потенциала представлены на рис. 10.

Из результатов математического моделирования (рис. 10,а) следует, что при изменении значения химического потенциала 0–1 эВ (при приложении внешнего электрического поля) постоянная распространения волны основного типа в линии передачи УНТ–графен существенно возрастает.



а)



б)

Рис. 9. Частотные зависимости относительной постоянной распространения (а) и коэффициента затухания (б) электромагнитной волны основного типа в линии передачи УНТ–графен при различных радиусах УНТ: $a = b = 1,5\lambda$, $s = 0,3\lambda$, $h = 0,1\lambda$, $\mu_c = 1$ эВ; кривые 1 – $r = 2,0$ нм; 2 – $r = 5,0$ нм; 3 – $r = 10,0$ нм; 4 – $r = 25,0$ нм; кривая 5 – для сравнения (трубка из меди)

Частотные зависимости коэффициента замедления $2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} / \Gamma'$ и коэффициента затухания Γ'' / Γ' на длине волны основного типа в линии пере-

дачи УНТ–графен для различных радиусов УНТ при изменении значения химического потенциала (0–1 эВ) в ТГц-диапазоне представлены на рис. 11–13.

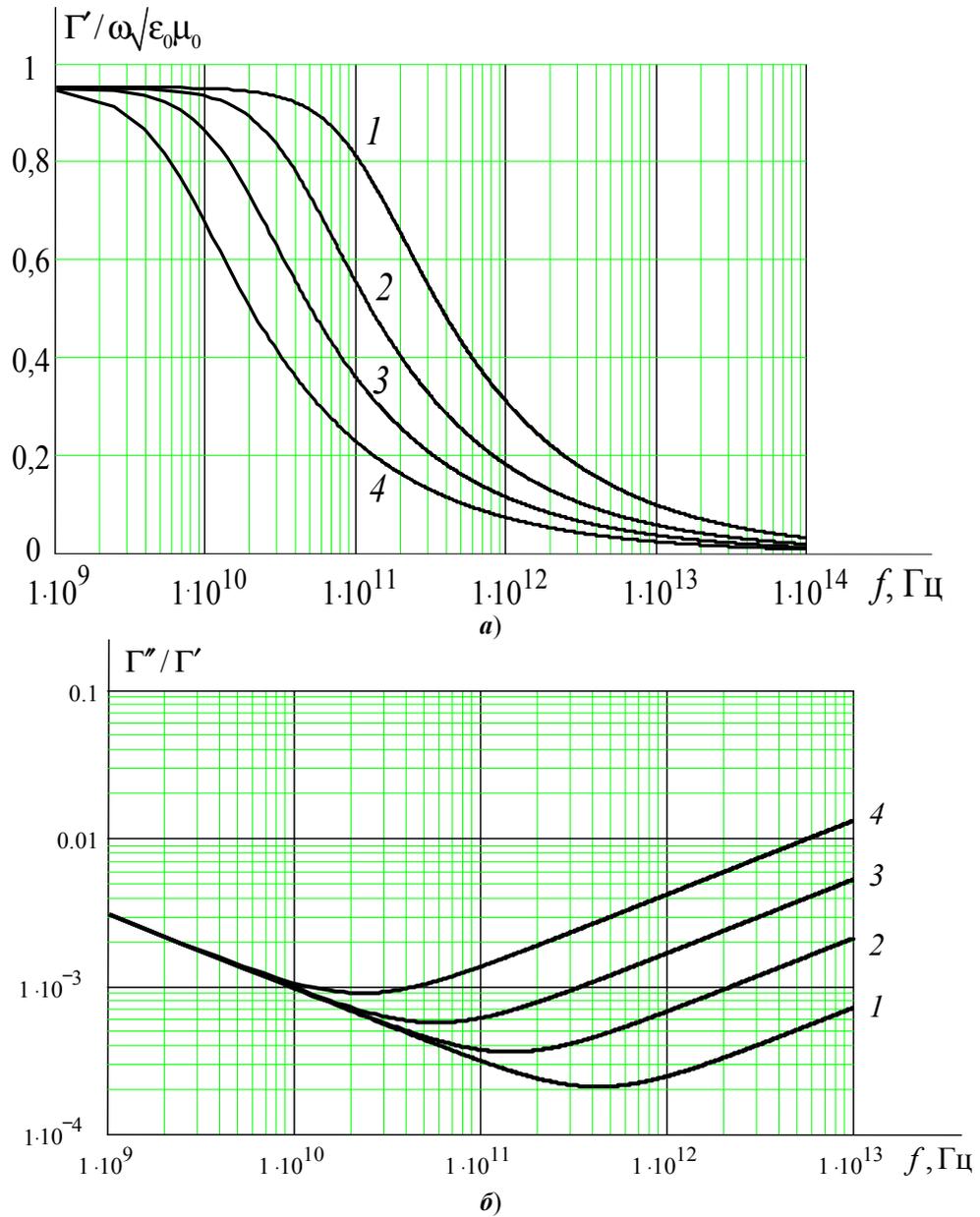


Рис. 10. Частотные зависимости относительной постоянной распространения (а) и коэффициента затухания (б) электромагнитной волны основного типа в линии передачи УНТ-графен при различных значениях химического потенциала μ_c : $a = b = 1,5\lambda$, $s = 0,3\lambda$, $h = 0,1\lambda$, $r = 2,71$ нм; кривые: 1 – $\mu_c = 1$ эВ; 2 – $\mu_c = 0,75$ эВ; 3 – $\mu_c = 0,5$ эВ; 4 – $\mu_c = 0$ эВ

Как следует из результатов математического моделирования (рис. 11–13,а), коэффициент замедления монотонно возрастает при увеличении значения химического потенциала (0–1 эВ). Дисперсионные зависимости коэффициента

замедления $2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} / \Gamma'$ волны основного типа от частоты определяются геометрическими размерами структуры (радиус УНТ, расстояние УНТ–графен). Дисперсионные характеристики при увеличении значения химического потенциала 0–1 эВ сдвигаются в сторону более высоких частот ТГц-диапазона.

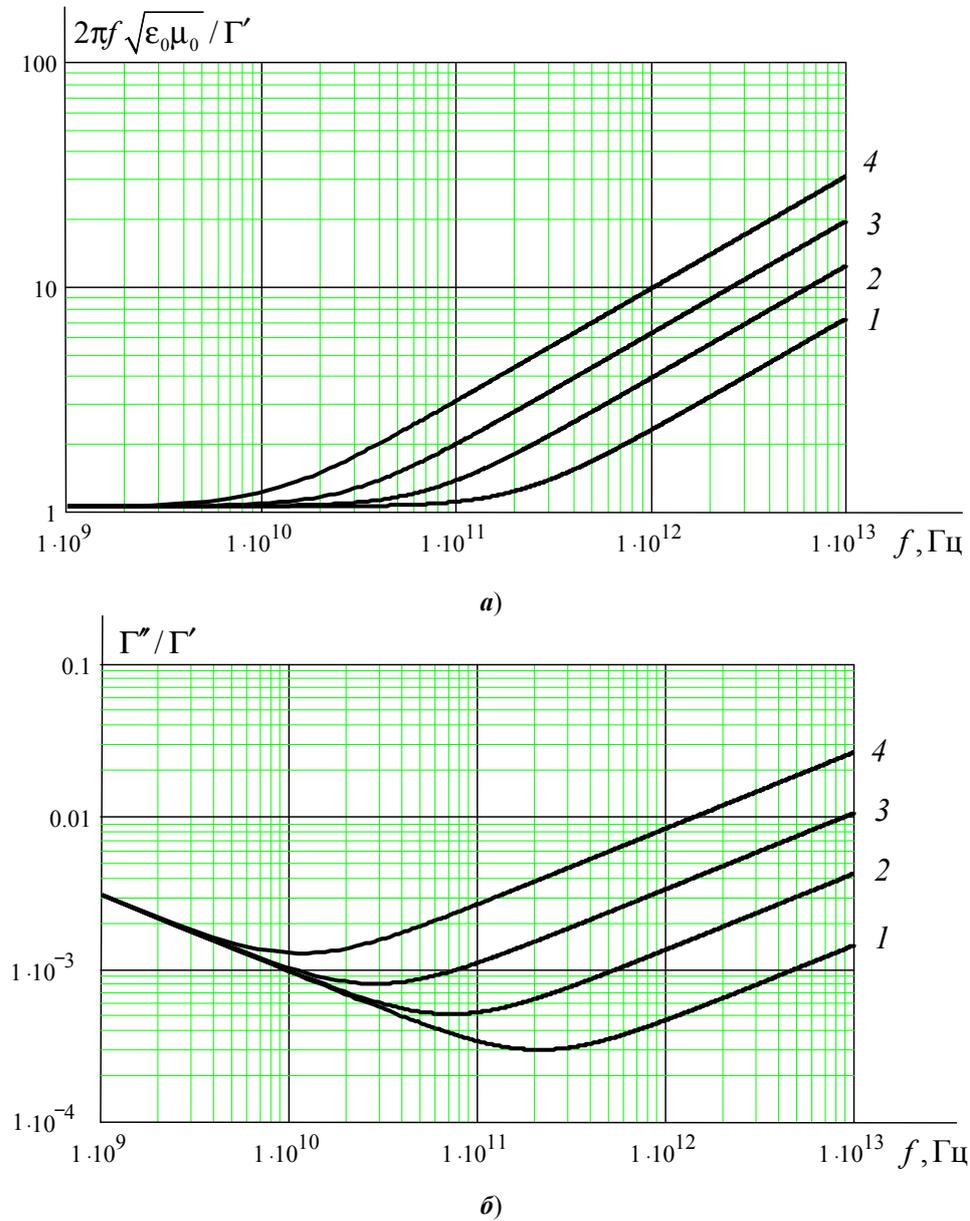


Рис. 11. Частотные зависимости коэффициента замедления (а) и затухания (б) на длине волны основного типа в линии передачи УНТ–графен при различных значениях химического потенциала μ_c : $r = 0,678$ нм; $a = b = 1,5\lambda$, $s = 0,3\lambda$, $h = 0,1\lambda$, кривые: 1 – $\mu_c = 1$ эВ; 2 – $\mu_c = 0,75$ эВ; 3 – $\mu_c = 0,5$ эВ; 4 – $\mu_c = 0$ эВ

Как видно из графиков (рис. 11–13, б), частотные зависимости коэффициента затухания Γ''/Γ' на длине волны основного типа в линии передачи

УНТ–графен имеют минимум, положение которого зависит от радиуса УНТ и значения химического потенциала. С уменьшением радиуса УНТ ($r = 2,71–0,678$ нм) минимум коэффициента затухания Γ''/Γ' на длине волны смещается в сторону более высоких частот ТГц-диапазона и управляется химическим потенциалом.

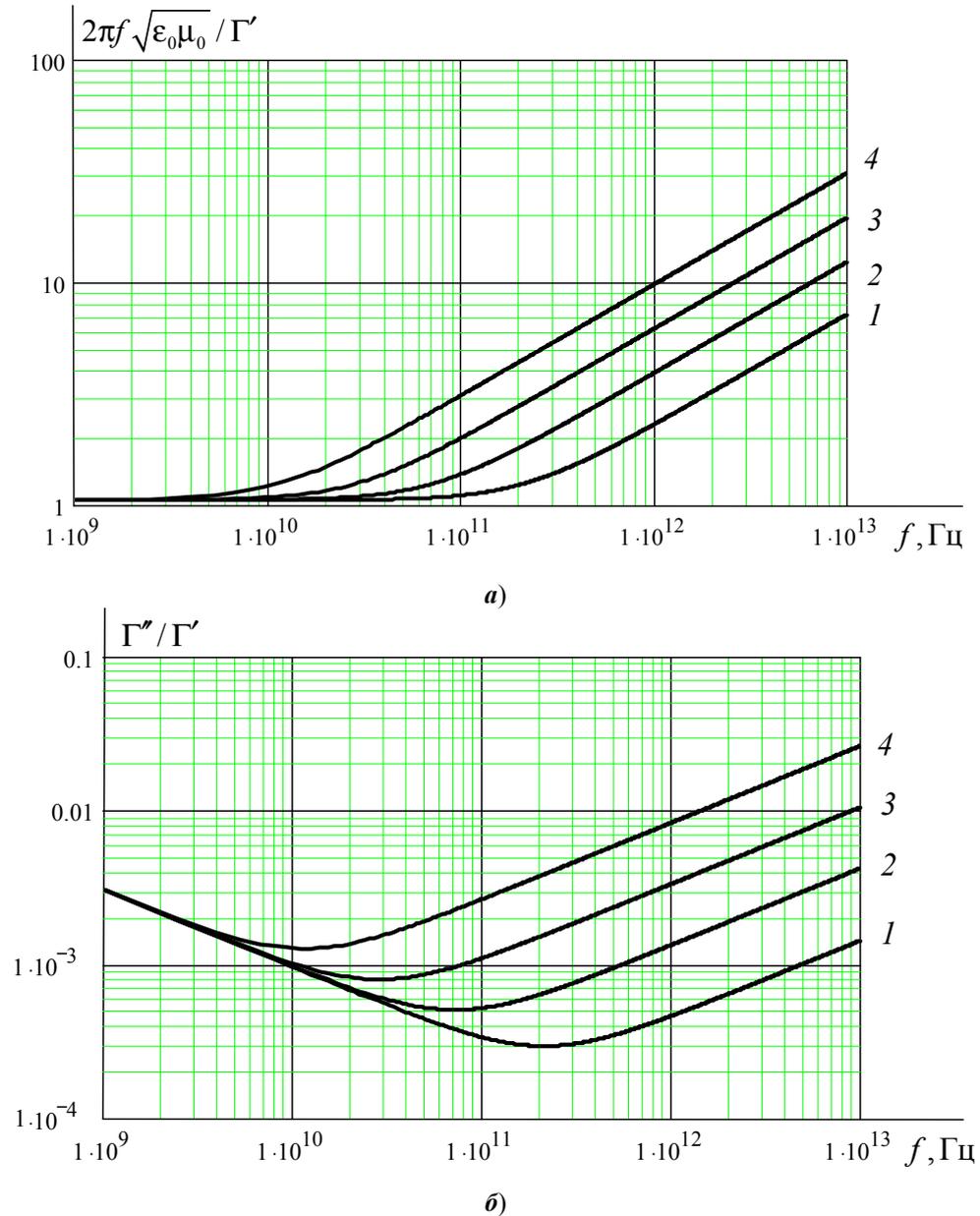


Рис. 12. Частотные зависимости коэффициента замедления (а) и затухания (б) на длине волны основного типа электромагнитной волны в линии передачи УНТ–графен при различных значениях химического потенциала μ_c : $r = 1,355$ нм; $a = b = 1,5\lambda$, $s = 0,3\lambda$, $h = 0,1\lambda$, кривые: 1 – $\mu_c = 1$ эВ; 2 – $\mu_c = 0,75$ эВ; 3 – $\mu_c = 0,5$ эВ; 4 – $\mu_c = 0$ эВ

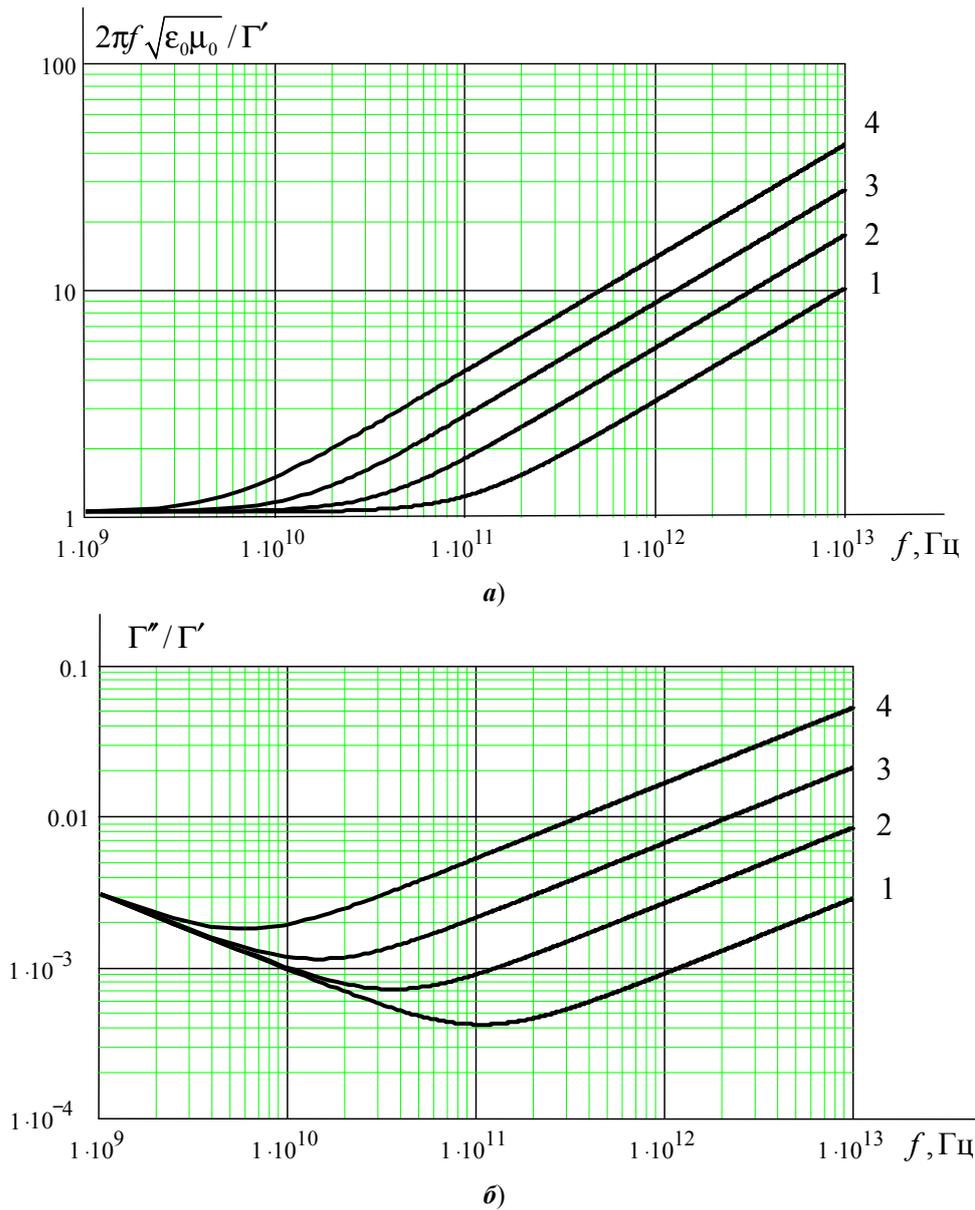


Рис. 13. Частотные зависимости коэффициента замедления (а) и затухания (б) на длине волны основного типа в линии передачи УНТ–графен при различных значениях химического потенциала μ_c : $r = 2,71$ нм, $a = b = 1,5\lambda$, $s = 0,3\lambda$, $h = 0,1\lambda$; кривые: 1 – $\mu_c = 1$ эВ; 2 – $\mu_c = 0,75$ эВ; 3 – $\mu_c = 0,5$ эВ; 4 – $\mu_c = 0$ эВ

Заключение

Впервые получены результаты математического моделирования распространения электромагнитных волн в волноведущих структурах нового класса на основе УНТ–графен для создания линий передачи и устройств на графеновой платформе в ТГц-диапазоне. Рассчитаны частотные зависимости коэффициента замедления и коэффициента затухания на длине волны основного типа в волноведущих структурах УНТ–графен при различных радиусах

УНТ в зависимости от химического потенциала в ТГц-диапазоне. Показано, что при увеличении значения химического потенциала (0–1 эВ) коэффициент замедления монотонно возрастает. Частотные зависимости коэффициента затухания имеют минимум, положение которого зависит от радиуса УНТ, с уменьшением радиуса УНТ ($r = 2,71\text{--}0,678$ нм) минимум коэффициента затухания смещается в сторону более высоких частот ТГц-диапазона и управляется химическим потенциалом. Дисперсионные зависимости волны основного типа определяются геометрическими размерами структуры (радиус УНТ, расстояние УНТ–графен). Из результатов математического моделирования следует, что изменение значения химического потенциала (действие внешнего электрического поля) является способом эффективного управления дисперсионными характеристиками электромагнитных волн в волноведущих структурах УНТ–графен в ТГц-диапазоне.

Список литературы

1. DailyTechInfo. – URL: <http://dailytechinfoorg.blogspot.ru>
2. Fine structure constant defines transparency of graphene / R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber // *Science*. – 2008. – № 320. – P. 1308–1308.
3. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov // *Science*. – 2004. – № 306 (5696). – P. 666–669.
4. **Дьячков, П. Н.** Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения / П. Н. Дьячков. – М.: Бином, 2006. – 293 с.
5. Semiconductor Physics / V. A. Labunov, B. G. Shulitski, A. L. Prudnikava, Y. P. Shaman, A. S. Basaev // *Quantum Electronics and Optoelectronics*. – 2010. – Vol. 13, № 2. – P. 137–141.
6. **Gonzalez, J.** Propagating, evanescent, and localized states in carbon nanotube-graphene junctions / J. Gonzalez, F. Guinea and J. Herrero // *Phys. Rev. B*. – Vol. 79. – 2009. – P. 165434.
7. **Hanson, G. W.** Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene / G. W. Hanson // *Journ. of Applied Physics*. – 2008. – Vol. 103. – P. 064302.
8. **Голованов, О. А.** Автономные блоки с виртуальными каналами Флоке и их применение для решения прикладных задач электродинамики / О. А. Голованов // *Радиотехника и электроника*. – 2006. – Т. 51, № 12. – С. 1423–1430.
9. **Макеева, Г. С.** Математическое моделирование распространения электромагнитных волн в наноструктурированных гиромангнитных средах методом автономных блоков с магнитными нановключениями и каналами Флоке / Г. С. Макеева, О. А. Голованов // *Радиотехника и электроника*. – 2009. – Т. 54, № 12. – P. 1455–1459.

References

1. *DailyTechInfo*. Available at: <http://dailytechinfoorg.blogspot.ru>
2. Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Booth T. J., Stauber T. *Science*. 2008, no. 320, pp. 1308–1308.
3. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. *Science*. 2004, no. 306 (5696), pp. 666–669.
4. D'yachkov P. N. *Uglerodnye nanotrubki: stroenie, svoystva, primeneniya* [Carbon nanotubes: structure, properties, application]. Moscow: Binom, 2006, 293 p.

5. Labunov V. A., Shulitski B. G., Prudnikava A. L., Shaman Y. P., Basaev A. S. *Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2010, vol. 13, no. 2, pp. 137–141.
6. Gonzalez J., Guinea F. and Herrero J. *Phys. Rev. B*. 2009, vol. 79, p. 165434.
7. Hanson G. W. *Journ. of Applied Physics*. 2008, vol. 103, p. 064302.
8. Golovanov O. A. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2006, vol. 51, no. 12, pp. 1423–1430.
9. Makeeva G. S., Golovanov O. A. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2009, vol. 54, no. 12, pp. 1455–1459.

Макеева Галина Степановна

доктор физико-математических наук,
профессор, кафедра радиотехники
и радиоэлектронных систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: radiotech@pnzgu.ru

Makeeva Galina Stepanovna

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, sub-department of radio
engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Голованов Олег Александрович

доктор физико-математических
наук, профессор, кафедра
общепрофессиональных дисциплин,
Пензенский филиал Военной
академии материально-технического
обеспечения (Россия, г. Пенза-5)

E-mail: golovanovol@mail.ru

Golovanov Oleg Aleksandrovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, sub-department
of general professional disciplines, Penza
branch of the Military Academy
of Maintenance Supplies (Penza-5, Russia)

УДК 535.32

Макеева, Г. С.

Электродинамический расчет комплексного коэффициента распространения электромагнитной волны в волноведущей структуре углеродная нанотрубка – графен в терагерцовом и инфракрасном диапазонах / Г. С. Макеева, О. А. Голованов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2015. – № 1 (33). – С. 140–155.