

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОХОЖДЕНИЯ ТЕМ-ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ГРАФЕН-ДИЭЛЕКТРИК В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Сочетание уникальных электронных и оптических свойств в дополнении с механической прочностью и эластичностью, стабильностью к условиям окружающей среды делают графен экстремально интересным материалом для создания в будущем устройств фотоники и оптоэлектроники. Целью данной работы является теоретическое исследование дифракции и взаимодействия электромагнитных волн с многослойными периодическими микро- и наноструктурами графен–диэлектрик на основе математического моделирования, базирующегося на решении уравнений Максвелла совместно с материальным уравнением среды (графена).

Материалы и методы. Разработана математическая модель дифракции электромагнитных волн и их взаимодействия с микро- и наноструктурами графен–диэлектрик, базирующаяся на решении краевой задачи для уравнений Максвелла, где поверхностная проводимость графена включена как параметр и определяется формулой Кубо с использованием разработанного вычислительного алгоритма на основе автономных блоков с каналами Флоке.

Результаты. Получены результаты электродинамического расчета коэффициентов прохождения ТЕМ-волны через многослойные периодические микро- и наноструктуры с различным числом N ячеек монослой графена – диэлектрик (при различном числе N листов графена), в зависимости от частоты при различных значениях химического потенциала (напряженности внешнего постоянного электрического поля) в терагерцовом диапазоне.

Выводы. Показано, что периодические микро- и наноструктуры графен–диэлектрик имеют серии чередующихся полос пропускания и непропускания в терагерцовом диапазоне. Как следует из результатов электродинамического расчета, коэффициенты прохождения в полосе непропускания значительно уменьшаются при увеличении числа слоев графена в периодических микро-структурах графен–диэлектрик и могут управляться внешним электрическим полем в терагерцовом диапазоне.

Ключевые слова: многослойные, периодические, микроструктуры графен–диэлектрик, формула Кубо, коэффициент прохождения, полоса непропускания, терагерцовый диапазон.

O. A. Golovanov, G. S. Makeeva, V. V. Varenitsa

ELECTRODYNAMIC CALCULATION OF TRANSMISSION COEFFICIENTS FOR TEM- WAVE THROUGH THE MULTILAYER PERIODIC GRAPHENE-DIELECTRIC STRUCTURES AT TERAHERZ FREQUENCY RANGE

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

Abstract.

Background. The combination of its unique optical and electronic properties, in addition to flexibility, robustness and environmental stability, makes graphene an extremely interesting material for future photonic and optoelectronic devices. The aim of the present work is to theoretically research diffraction and interaction of electromagnetic waves with multilayer periodic micro- and nanostructures of graphene-dielectric at terahertz frequency ranges, using mathematical modeling by solving the Maxwell's equations, complemented by the constitutive law for graphene.

Materials and methods. The mathematical model of diffraction and interaction of electromagnetic waves with multilayer periodic micro- and nanostructures of graphene-dielectric 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 transmission coefficients for the TEM-wave through multilayer periodic micro- and nanostructures of graphene-dielectric (for the different number of layers N in the graphene-dielectric stack) depending on the frequency were obtained for different values of chemical potential (the external electric field intensity) at the THz range.

Conclusions. It is shown that the multilayer micro- and nanostructures of graphene-dielectric possess band-gap properties and supports a series of bandpass and band-stop regions. As it follows from the results of the electrodynamic calculation, the transmission coefficients in band-stop regions decrease depending on the increasing number of layers N in the periodic graphene-dielectric stack and can be tuned by the external electric field at the terahertz frequency range.

Key words: multilayer, periodic, microstructures graphene-dielectric, Kubo formula, transmission coefficient, band-stop region, terahertz frequency range.

Введение

В нанoeлектронике создаются предпосылки решения проблем миниатюризации устройств микроволнового и терагерцового (ТГц) диапазонов на субмикронном уровне. Основу для создания нового поколения устройств составляют новые нанотехнологические материалы, такие как графен, фуллерены, углеродные нанотрубки, структуры на основе квантовых ям, квантовых проводов и квантовых точек.

Графен – низкоразмерная структура, которая состоит из одного атомарного слоя графита и имеет в своей основе сетку sp^2 -гибридизованных атомов углерода, соединенных посредством sp -связей в гексагональную $2D$ -кристаллическую решетку (рис. 1). Теоретическое исследование графена началось задолго до получения реальных образцов материала [1–3].

Графен имеет уникальные электронные и оптические свойства, обусловленные его кристаллической и электронной структурами, для создания устройств, реализующих принципы баллистической электроники, спинтроники, оптоэлектроники, наноплазмоники и других перспективных альтернатив традиционной полупроводниковой электронике. Графен из всех твердых тел обладает максимальной подвижностью электронов, которой можно управлять.

В этой связи актуальной является проблема исследования взаимодействия электромагнитного излучения с многослойными периодическими микро- и наноструктурами монослои графена – диэлектрик [4–6] на основе математического моделирования, базирующегося на решении уравнений Макс-

вместе с материальными уравнениями среды (графена), с целью разработки новых типов быстродействующих электронно-управляемых устройств в ТГц-диапазоне.

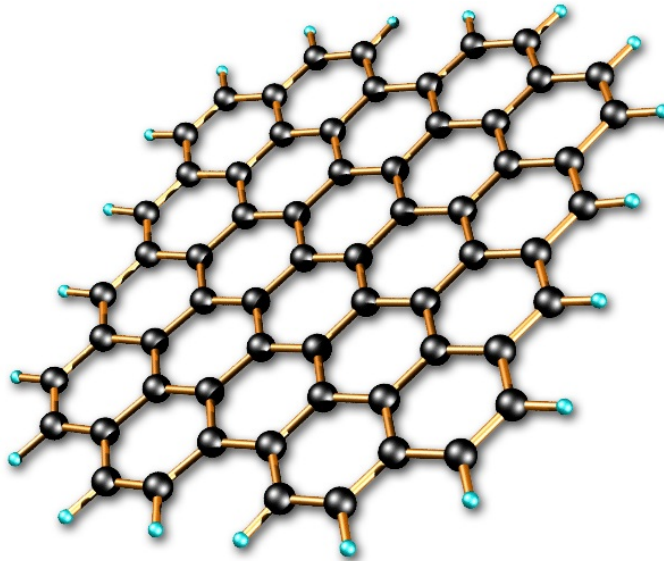


Рис. 1. Структура графена [2]

1. Математическая модель

Математическая модель взаимодействия электромагнитных волн с электродинамическими структурами на основе графена базируется на решении краевой задачи для системы уравнений Максвелла

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

$$\operatorname{div} \vec{D}(t) = \rho, \quad \operatorname{div} \vec{B}(t) = 0$$

совместно с материальными уравнениями среды (графена)

$$\vec{D}(t) = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}(t),$$

$$\vec{B}(t) = \mu_0 \mu \vec{H}(t),$$

$$\vec{J}(t) = \sigma \vec{E}(t)$$

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;

ρ – объемная плотность электрического заряда; ϵ_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные.

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

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

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.

В уравнения Максвелла (1) входит объемная удельная проводимость σ , которую необходимо выразить через поверхностную проводимость σ_s .

Для монослоя графена вводится комплексная диэлектрическая проницаемость [7]:

$$\epsilon(\omega, \mu_c) = 1 + \frac{i\sigma(\omega, \mu_c)}{\epsilon_0 \omega d}. \quad (3)$$

где d – эффективная толщина монослоя графена.

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

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

$$\text{rot } \vec{H} = i\omega \epsilon_0 \epsilon_b(\omega, \mu_c) \vec{E}, \quad \text{rot } \vec{E} = -i\omega \mu_0 \mu_b \vec{H}, \quad (4)$$

где $\epsilon = \epsilon_b$, $\mu = \mu_b$ – диэлектрическая и магнитная проницаемости графена, которые считаем скалярными величинами; нескомпенсированный электрический заряд отсутствует [8].

2. Результаты электродинамического расчета коэффициентов прохождения ТЕМ-волны через многослойные структуры из листов графена в ТГц-диапазоне

Методом автономных блоков с каналами Флоке (ФАБ) проведен электродинамический расчет коэффициента прохождения ТЕМ-волны через многослойные структуры из листов графена в ТГц-диапазоне. Многослойная структура из листов графена и расчетная модель на основе ФАБ представлена на рис. 2.

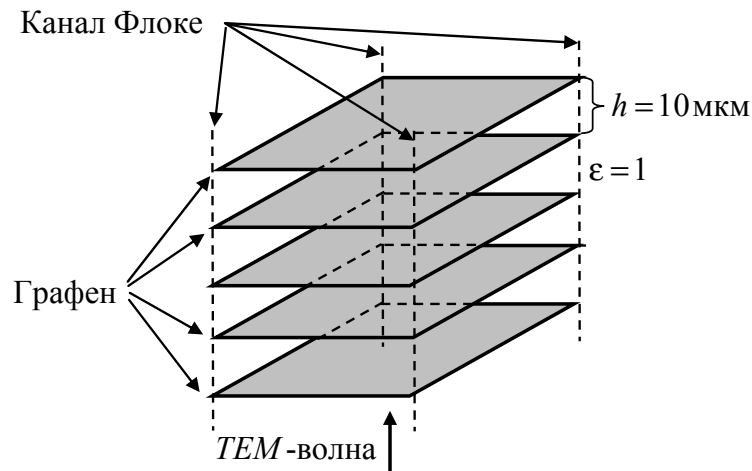


Рис. 2. Расчетная модель на основе ФАБ прохождения ТЕМ-волны через многослойные структуры из листов графена

Из графиков на рис. 3 видно, что полосой непропускания можно управлять, изменяя химический потенциал, при этом полоса непропускания при значении химического потенциала $\mu_c = 1,0 \text{ эВ}$ в два раз шире, чем при $\mu_c = 0,5 \text{ эВ}$.

На рис. 4 приведены результаты расчета коэффициента прохождения ТЕМ-волны через многослойные структуры из листов графена (рис. 2) методом конечных разностей во временной области (FDTD) [5].

Кривые на рис. 4 совпадают с кривыми на рис. 3 (при нанесении на один график они сливаются). Метод FDTD является численным, его точность зависит от выбора шага.

На частотах 50 ТГц и выше монослой графена для электромагнитной волны становится оптически прозрачным. Фильтры на основе многослойных структур графен–диэлектрик являются интерференционными, их реализация на частотах выше 50 ТГц весьма проблематична из-за низкой оптической плотности. Аналогом такого фильтра в оптике являются многослойные диэлектрические покрытия, состоящие из четвертьволновых слоев с чередующимися высокими и низкими показателями преломления. Преимущество фильтров на основе многослойных структур из листов графена – это их управляемость.

Ранее исследовалось прохождение оптического излучения через тонкий металлизированный слой диэлектрика. Спектр прохождения через такие многослойные структуры состоит из ряда полос пропускания и непропускания. Затем в работе [4] было предложено заменить тонкий металлизированный слой оптической системы металлическими сетчатыми решетками (рис. 5). Спектр пропускания металлических решеток в микроволновом диапазоне включает несколько полос пропускания, обусловленных резонансами в связанных резонаторах Фабри – Перо со слоями диэлектрика. Аналогично поведению тонкого металлизированного слоя на оптических частотах металлические сетки представляют собой частично отражающую поверхность с низким коэффициентом пропускания в ТГц-диапазоне.

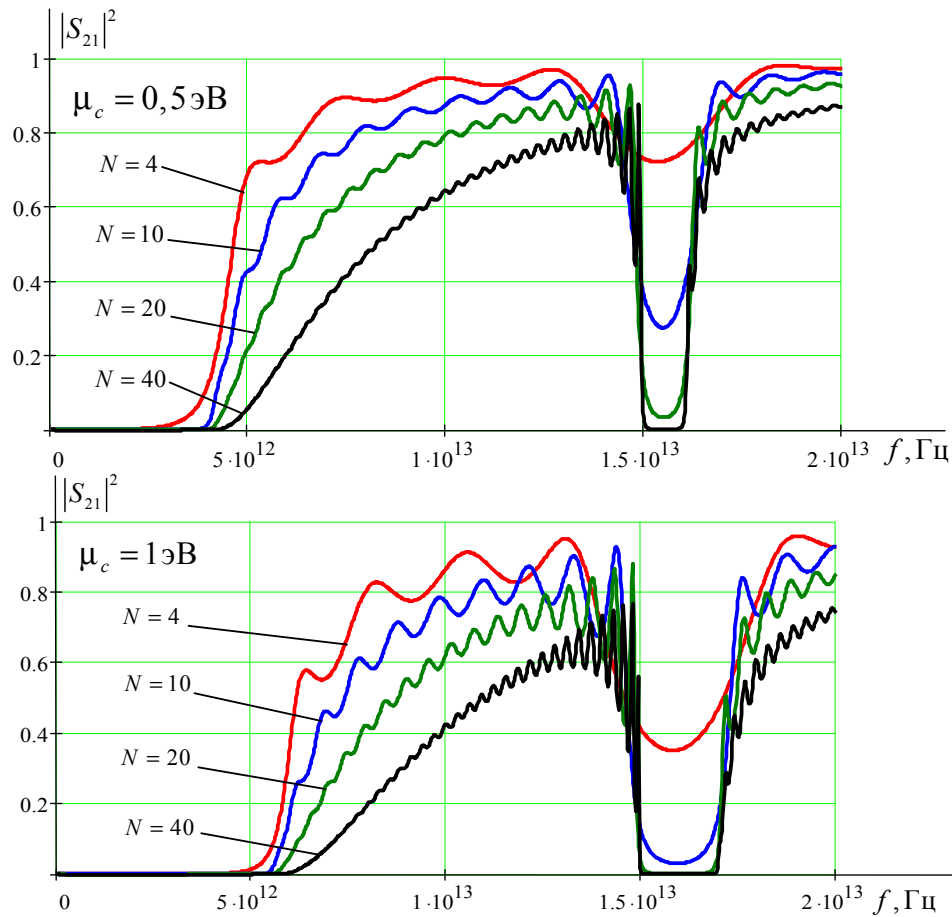


Рис. 3. Зависимости квадрата коэффициента прохождения через многослойные структуры из листов графена от частоты и числа листов в структуре для различных значений химического потенциала (предложенная методика)

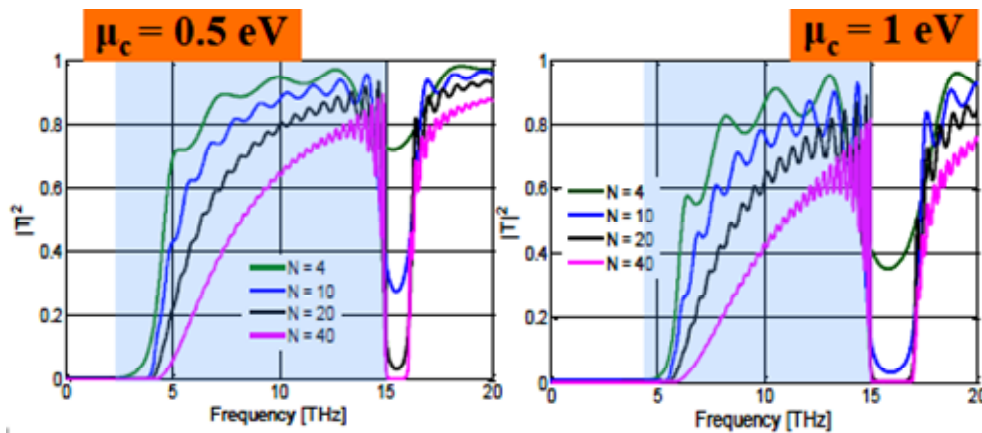


Рис. 4. Зависимости квадрата коэффициента прохождения через многослойные структуры из листов графена от частоты и числа листов в структуре для различных значений химического потенциала (метод конечных разностей во временной области (FDTD)) [5]; T – коэффициент прохождения

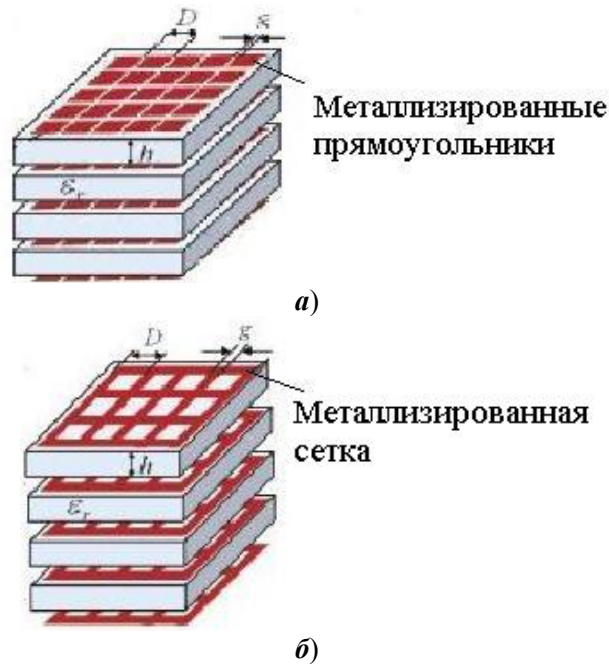


Рис. 5. 3D-решетки: *a* – металлизированных прямоугольников, *б* – металлизированных сеток [4]

Монослой графена, используемые в периодической 3D-решетке, показанной на рис. 5, имеют низкий коэффициент пропускания в нижней части ТГц-диапазона и ведут себя аналогично частично отражающей поверхности на ТГц-частотах. То есть монослой графена в начале ТГц-диапазона имитирует свойства металлической сетки или тонкого металлизированного слоя на оптических частотах.

3. Результаты электродинамического расчета коэффициентов прохождения ТЕМ-волны через планарные слоистые микроструктуры графен-диэлектрик в ТГц-диапазоне

Методом ФАБ проведен электродинамический расчет коэффициента прохождения ТЕМ-волны через двустороннюю структуру графен-диэлектрик (монослой графена, ограничивающие диэлектрическую пластину) в ТГц-диапазоне. Расчетная модель на основе ФАБ представлена на рис. 6.

Результаты электродинамического расчета коэффициента прохождения ТЕМ-волны в зависимости от частоты в ТГц-диапазоне представлены на рис. 7.

Методом автономных блоков с каналами Флоке (ФАБ) [9] проведен электродинамический расчет коэффициента прохождения ТЕМ-волны через планарные слоистые 2D-микроструктуры графен-диэлектрик (монослой графена между диэлектрическими пластинами) в ТГц-диапазоне. Расчетная модель на основе ФАБ представлена на рис. 8.

Результаты электродинамического расчета квадрата коэффициента прохождения $|R_{12}|^2$ ТЕМ-волны в зависимости от частоты для различных значений химического потенциала (0 – 1 эВ) в ТГц диапазоне представлены на рис. 9.

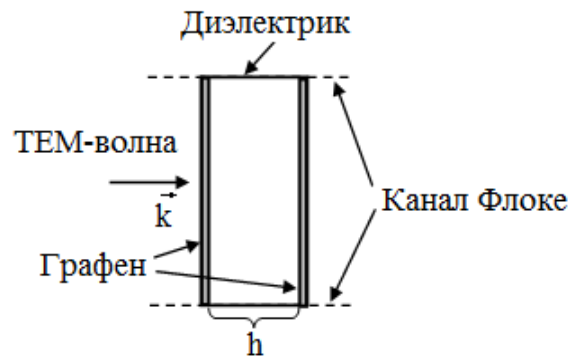


Рис. 6. Расчетная модель на основе ФАБ прохождения ТЕМ-волны через структуру графен–диэлектрик (монослой графена, ограничивающие диэлектрическую пластину)

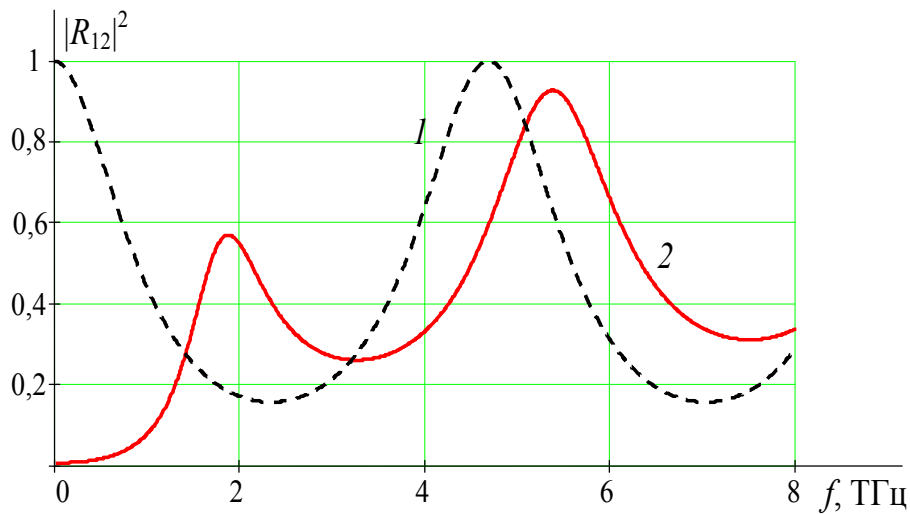


Рис. 7. Зависимость квадрата коэффициента прохождения $|R_{12}|^2$ ТЕМ-волны через структуру графен–диэлектрик (монослой графена, ограничивающие диэлектрическую пластину) для значения химического потенциала $\mu_c=0,5$ эВ:
 $h = 10$ мкм, $\epsilon_d = 10,2$; 1 – диэлектрический слой без графена,
 2 – структура графен–диэлектрик

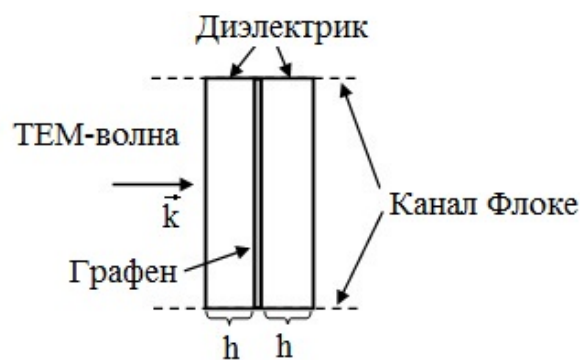


Рис. 8. Расчетная модель на основе ФАБ прохождения ТЕМ-волны через слоистую 2D-микроструктуру графен–диэлектрик (монослой графена между диэлектрическими пластинами)

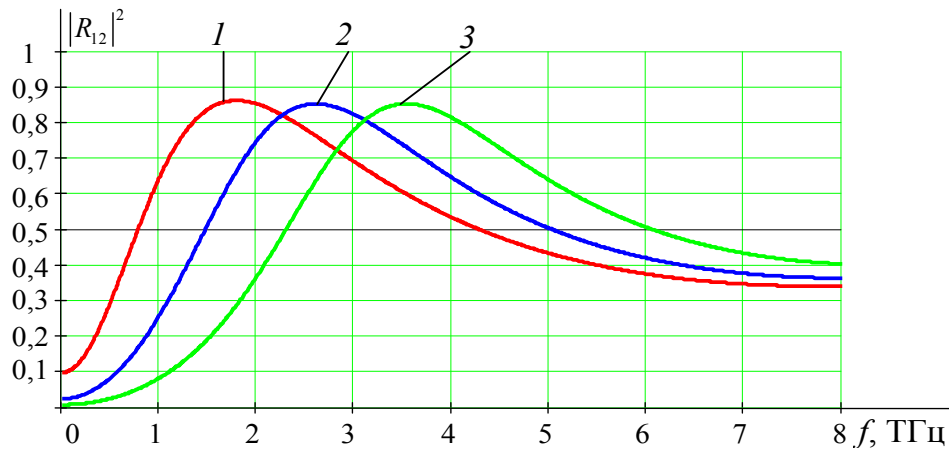


Рис. 9. Зависимость квадрата коэффициента прохождения коэффициента пропускания $|R_{12}|^2$ ТЕМ-волны через планарную слоистую 2D-микроструктуру графен-диэлектрик (монослой графена между диэлектрическими пластинами) для различных значений химического потенциала μ_c : $h = 10$ мкм, $\epsilon_d = 10,2$; 1 – $\mu_c = 0,2$ эВ; 2 – $\mu_c = 0,5$ эВ; 3 – $\mu_c = 1$ эВ

Из результатов расчета (рис. 7, 9) следует, что имеется полоса непропускания, обусловленная резонансом в резонаторе Фабри – Перро, в нижней части ТГц-диапазона. Резонансный минимум коэффициента прохождения ТЕМ-волны через планарные слоистые микроструктуры графен-диэлектрик и ширина полосы непропускания определяются значениями химического потенциала (управляются внешним электрическим полем).

4. Результаты электродинамического расчета коэффициентов прохождения ТЕМ-волны через периодические наноструктуры монослой графена – диэлектрик

Методом ФАБ проведен электродинамический расчет частотных зависимостей коэффициента прохождения ТЕМ-волны через периодические структуры монослой графена – диэлектрик (монослой графена, ограничивающие диэлектрическую пластину) в ТГц-диапазоне. Расчетная модель на основе ФАБ представлена на рис. 10.

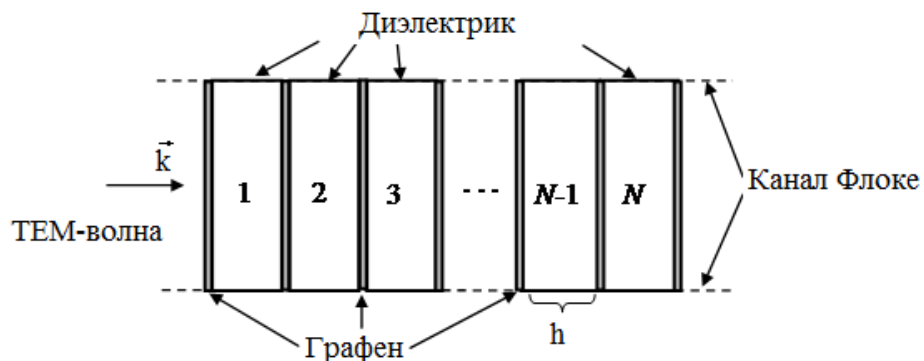


Рис. 10. Расчетная модель на основе ФАБ прохождения ТЕМ-волны через периодическую структуру монослой графена – диэлектрик

Результаты электродинамического расчета частотных зависимостей коэффициента прохождения ТЕМ-волны через периодические структуры монослой графена – диэлектрик в ТГц диапазоне представлены на рис. 11.

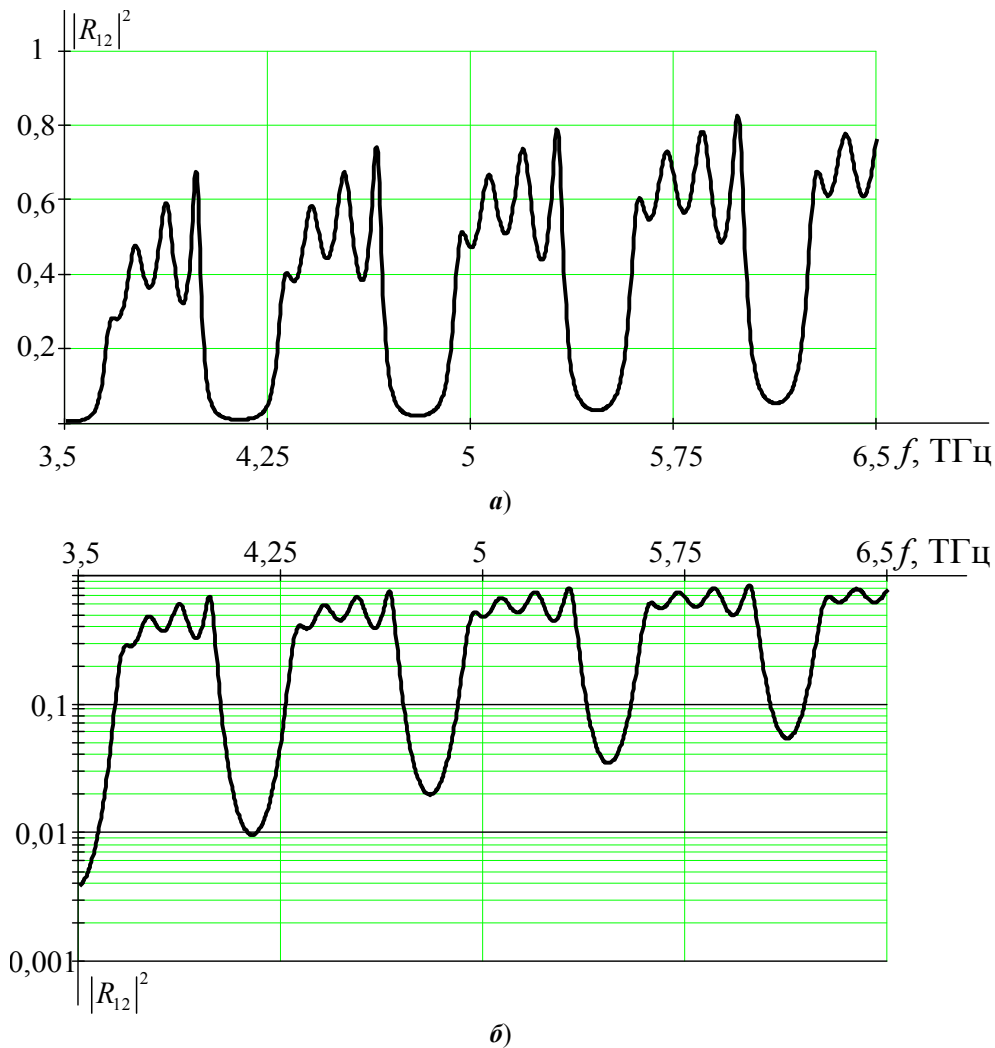


Рис. 11. Частотные зависимости квадрата коэффициента прохождения $|R_{12}|^2$ ТЕМ-волны через четырехслойную периодическую наноструктуру монослой графена – диэлектрик при значении химического потенциала $\mu_c = 1,0$ эВ: $h = 150$ мкм, $\epsilon_d = 2,2$ (а); та же частотная зависимость в логарифмическом масштабе (б)

Из результатов расчета (рис. 10) следует, что имеются серии чередующихся полос пропускания и полос непропускания, обусловленных резонансом в ячейках (монослой графена, ограничивающие диэлектрическую пластину) как в связанных резонаторах Фабри – Перро, в ТГц-диапазоне. Полосы непропускания расположены на характерных частотах, не зависящих от значения химического потенциала.

Методом ФАБ получены результаты электродинамического расчета частотных зависимостей коэффициента прохождения ТЕМ-волны через многослойные периодические наноструктуры монослой графена – диэлектрик

(монослой графена, ограничивающие диэлектрическую пластину) с различным числом N ячеек в зависимости от химического потенциала в ТГц-диапазоне.

Результаты электродинамического расчета коэффициента прохождения ТЕМ-волны в зависимости от частоты при различном числе диэлектрических слоев (10–25) в ТГц-диапазоне представлены на рис. 12.

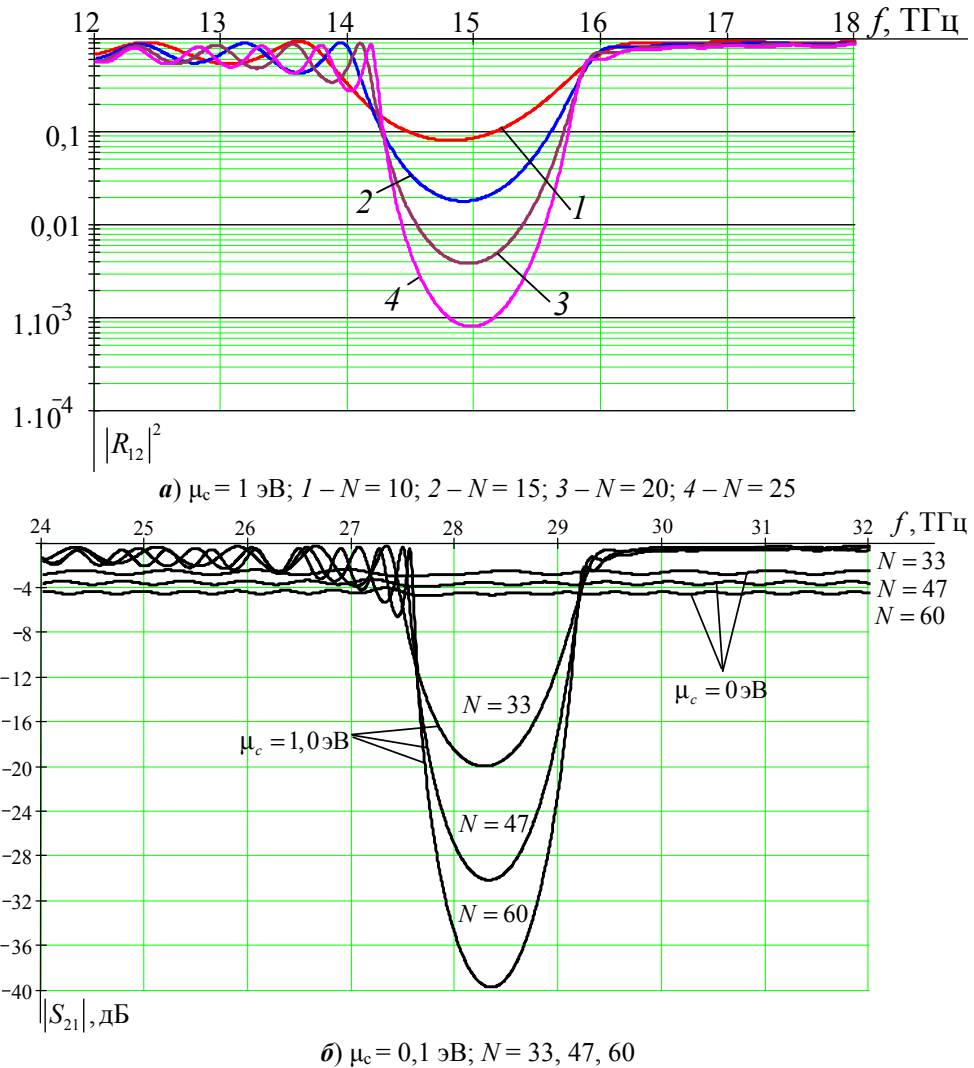


Рис. 12. Частотная зависимость квадрата коэффициента прохождения $|R_{12}|^2$ через многослойные периодические наноструктуры монослой графена – диэлектрик при различном числе диэлектрических слоев N : $h = 7,04$ мкм

Из результатов расчета (рис. 12) следует, что имеются серии чередующихся полос пропускания и полос непропускания, обусловленных резонансом в ячейках (монослой графена, ограничивающие диэлектрическую пластину), как в связанных резонаторах Фабри – Перро, в ТГц-диапазоне. Поло-

сы непропускания расположены на характерных частотах, не зависящих от значения химического потенциала и числа N слоев графен–диэлектрик. При увеличении числа диэлектрических слоев коэффициент прохождения в полосе непропускания значительно уменьшается.

На рис. 12,б показан график зависимостей коэффициента прохождения через многослойные структуры графен–диэлектрик при различном числе N листов графена для двух значений химического потенциала, равных 0 и 1,0 эВ. Как следует из результатов математического моделирования, при значении химического потенциала $\mu_c = 0,0$ эВ (внешнее электрическое поле отсутствует) излучение ослабевает на 2–4,5 дБ в зависимости от числа N листов графена. При приложении внешнего электрического поля, которому соответствует химический потенциал $\mu_c = 1,0$ эВ, излучение ослабевает на 20–40 дБ в зависимости от числа N листов графена.

Результаты электродинамического расчета коэффициента прохождения ТЕМ-волны в зависимости от частоты при различных значениях химического потенциала (0–1 эВ) в ТГц-диапазоне представлены на рис. 13.

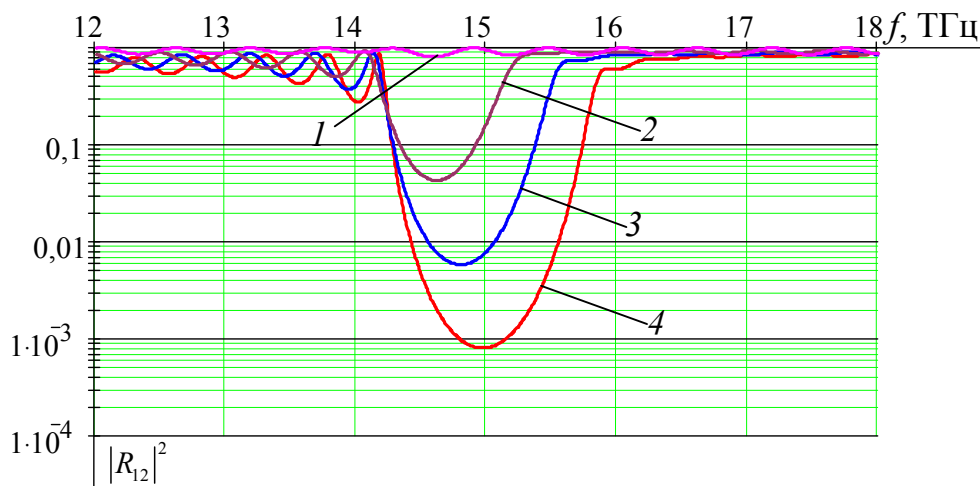


Рис. 13. Частотная зависимость квадрата коэффициента прохождения $|R_{12}|^2$ через многослойные периодические наноструктуры монослой графена – диэлектрик при различных значениях химического потенциала μ_c : $N = 25$, $h = 7,04$ мкм;
1 – $\mu_c = 0,0$ эВ; 2 – $\mu_c = 0,5$ эВ; 3 – $\mu_c = 0,75$ эВ; 4 – $\mu_c = 1,0$ эВ

Из результатов расчета (рис. 13) следует, что имеются серии чередующихся полос пропускания и полос непропускания, обусловленных резонансом в ячейках (монослой графена, ограничивающие диэлектрическую пластину), как в связанных резонаторах Фабри – Перро, в ТГц-диапазоне. При изменении химического потенциала (0–1 эВ) (величины внешнего постоянного электрического поля) полоса непропускания существенно расширяется, а значения минимума коэффициента прохождения уменьшаются.

Результаты электродинамического расчета коэффициента прохождения ТЕМ-волны в зависимости от частоты при различной толщине диэлектрических слоев (6–9 мкм) в ТГц-диапазоне представлены на рис. 14.

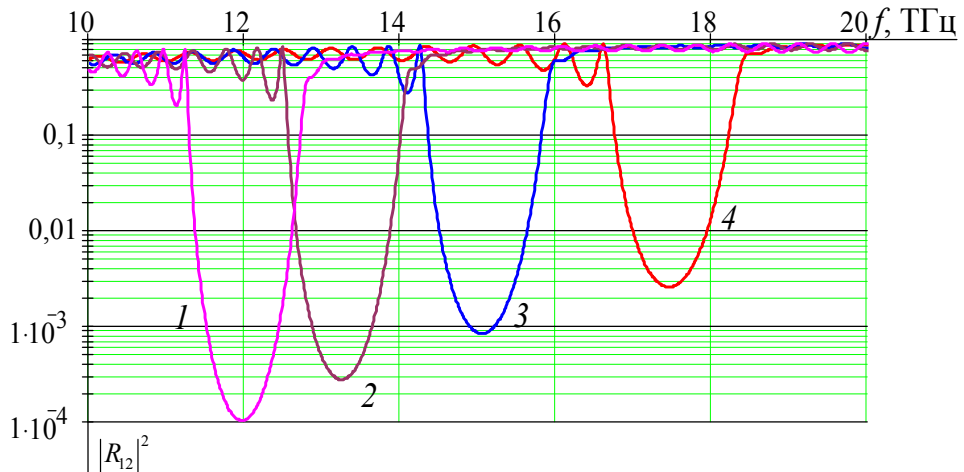


Рис. 14. Частотная зависимость квадрата коэффициента прохождения $|R_{12}|^2$ через многослойные периодические наноструктуры монослои графена – диэлектрик для различной толщины диэлектрических слоев h : $\mu_c = 1\text{эВ}$, $N = 25$;
 1 – $h = 9$ мкм; 2 – $h = 8$ мкм; 3 – $h = 7$ мкм; 4 – $h = 6$ мкм

Из результатов расчета (рис. 14) следует, что имеются серии чередующихся полос пропускания и полос непропускания, обусловленных резонансом в ячейках (монослои графена, ограничивающие диэлектрическую пластину), как в связанных резонаторах Фабри – Перро, в ТГц-диапазоне. Полосы непропускания расположены на характерных частотах, не зависящих от значения химического потенциала и числа N слоев графен–диэлектрик.

Исследованные структуры могут быть применены для создания управляемых широкополосных фильтров планарной конструкции. Особенно перспективными являются защитные управляемые фильтры, построенные на основе многослойных структур графен–диэлектрик.

Как показывают результаты моделирования, изменяя химический потенциал при помощи напряженности внешнего электрического поля, что приводит к изменению проводимости графена, можно управлять коэффициентом прохождения ТГц-излучения через фильтры на основе многослойных структур графен–диэлектрик.

Список литературы

1. 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. – Vol. 306 (5696). – P. 666–669.
2. Fine structure constant defines transparency of grapheme / R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, A. K. Geim // *Science*. – 2008. – Vol. 320. – P. 1308–1308.
3. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in grapheme / K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, A. A. Firsov // *Nature*. – 2005. – Vol. 438. – P. 197.
4. Enhanced transmission with a graphene-dielectric microstructure at low-terahertz frequencies / C. S. R. Kaipa, A. B. Yakovlev, G. W. Hanson, Y. R. Padooru, F. Medina, F. Mesa // *Physical Review B*. – 2012. – Vol. 85. – P. 245407.

5. Low-Terahertz Transmissivity and Broadband Planar Filters Using Graphene-Dielectric Stack / C. S. R. Kaipa, A. B. Yakovlev, G. W. Hanson, Y. R. Padooru, F. Medina, F. Mesa // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Montréal (17–22 June 2012). – Québec, Canada, 2012.
6. Dual capacitive-inductive nature of periodic graphene patches: Transmission characteristics at low-terahertz frequencies / Y. R. Padooru, A. B. Yakovlev, C. S. R. Kaipa, G. W. Hanson, F. Medina, and F. Mesa // Phys. Rev. B. – 2013. – Vol. 87. – P. 115401.
7. **Hanson, G. W.** Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene / G. W. Hanson // J. of Appl. Phys. – 2008. – Vol. 103. – P. 064302.
8. **Ryzhii, V.** Plasma waves in two-dimensional electron-hole system in gated graphene heterostructures / V. Ryzhii, A. Satou, and T. Otsuji // J. Appl. Phys. – 2007. – Vol. 101. – P. 024509 (1-5).
9. **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.

References

1. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. *Science*. 2004, vol. 306 (5696), pp. 666–669.
2. Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Booth T. J., Stauber T., Peres N. M. R., Geim A. K. *Science*. 2008, vol. 320, pp. 1308–1308.
3. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Katsnelson M. I., Grigorieva I. V., Dubonos S. V., Firsov A. A. *Nature*. 2005, vol. 438, p. 197.
4. Kaipa C. S. R., Yakovlev A. B., Hanson G. W., Padooru Y. R., Medina F., Mesa F. *Physical Review B*. 2012, vol. 85, p. 245407.
5. Kaipa C. S. R., Yakovlev A. B., Hanson G. W., Padooru Y. R., Medina F., Mesa F. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Montréal (17–22 June 2012)*. Québec, Canada, 2012.
6. Padooru Y. R., Yakovlev A. B., Kaipa C. S. R., Hanson G. W., Medina F. and Mesa F. *Phys. Rev. B*. 2013, vol. 87, p. 115401.
7. Hanson G. W. *J. of Appl. Phys.* 2008, vol. 103, p. 064302.
8. Ryzhii V., Satou A. and Otsuji T. *J. Appl. Phys.* 2007, vol. 101, p. 024509 (1–5).
9. Golovanov O. A. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2006, vol. 51, no. 12, pp. 1423–1430.

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)

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)

Вареница Виталий Викторович

директор департамента аудита кода
и сертификации, Научно-
производственное объединение
«Эшелон» (Россия, г. Москва,
ул. Электрозаводская, 24)

E-mail: v.varenitsa@cnpo.ru

Varenitsa Vitaliy Viktorovich

Director of the department of code audit
and certification, Research and production
association "Eshelon"
(24 Electrozavodskaya street,
Moscow, Russia)

УДК 535.32

Голованов, О. А.

Электродинамический расчет коэффициентов прохождения ТЕМ-волны через многослойные периодические структуры графен–диэлектрик в терагерцовом диапазоне / О. А. Голованов, Г. С. Макеева, В. В. Вареница // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 108–122.