

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для всех образцов, независимо от подложки и метода синтеза, температурное поведение сопротивления при низких температурах, наиболее вероятно, связано с квантовыми поправками к проводимости Друде. При этом влияние методики синтеза проявляется в величине проводимости образцов, а также в типе носителей заряда. В тоже время не выявлено заметного влияния типа подложки на свойства образцов, что предположительно связано со слабым влиянием подложки на свойства образца по сравнению с влиянием синтеза и переноса на подложку графена.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Modification of graphene electronic properties via controllable gas-phase doping with copper chloride / M. G. Rybin [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2018. – V. 112. – P. 033107.
2. Влияние магнитных частиц Co - CoO на свойства электропереноса в однослойном графене / Ю.А. Федотова [и др.] // ФТТ. – 2020. – вып. 2. – С. 316-325.
3. Weak Localization in Graphene Flakes / F. V. Tikhonenko [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2008. – V. 100. – P. 056802.
4. Pudalov, V. M. Metallic conduction, apparent metal-insulator transition and related phenomena in two-dimensional electron liquid / V. M. Pudalov // Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi". – 2004. – V. 157. – 2008. – P. 335

## ПЛАЗМОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГРАФЕНОВОЙ НАНОСТРУКТУРЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**А. В. Фельшерук, А. Л. Данилюк**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: felsheruk1994@gmail.com*

Представлены результаты моделирования коэффициентов распространения и поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) при различных химических потенциалах в однослойном графене в зависимости от приложенного перпендикулярно к плоскости графена магнитного поля в терагерцевом частотном диапазоне. Полученные частотные зависимости показали, что управлять коэффициентами распространения и поглощения ЭМИ графена можно путем изменения значения величины индукции магнитного поля.

**Ключевые слова:** графен; терагерцевый диапазон; плазмон; электромагнитное излучение.

## PLASMONIC EFFECTS IN A GRAPHENE NANOSTRUCTURE IN A MAGNETIC FIELD

**A. V. Felsharuk, A. L. Danilyuk**

---

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki, 6, 220013 Minsk, Belarus  
Corresponding author: A. V. Felsharuk (felsheruk1994@gmail.com)*

The results of modeling the coefficients of propagation and absorption of electromagnetic radiation (EMR) at various chemical potentials in single-layer graphene are presented,

depending on the magnetic field applied perpendicular to the graphene plane in the terahertz frequency range. The obtained frequency dependences showed that the EMR propagation and absorption coefficients of graphene can be controlled by changing the value of the magnetic field induction.

**Key words:** grapheme; terahertz range; plasmon; electromagnetic radiation.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время считается установленным вывод, что на границе между проводником и диэлектриком возможно получить поверхностные плазмоны с той же частотой, что и внешние электромагнитные волны, но с намного меньшей длиной волны. Это позволит использовать плазмоны в наноструктурах для переноса информации внутри интегральной микросхемы. Плазмонные межсоединения стали бы настоящим прорывом в области повышения рабочих частот интегральных микросхем. В этом плане перспективным направлением для решения подобной задачи является исследование плазмонных колебаний в терагерцевом диапазоне частот и, в частности, с использованием графена на диэлектрической подложке. Однако на этом пути еще предстоит решить ряд не только технологических, но и физических задач по возбуждению, распространению и детектированию плазмонных колебаний с контролируемыми параметрами.

Малая циклотронная масса электронов и зависимость концентрации носителей в графене от внешнего магнитного поля позволяют осуществлять контроль плазмонов в графене с помощью изменения величины приложенного перпендикулярно к структуре магнитного поля. Этот альтернативный метод способен избавить от необходимости прямого электрического контакта для управления оптическим откликом однослойной графеновой наноструктуры [1].

Целью данной работы является моделирование коэффициентов распространения и поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) в однослойном графене на диэлектрической подложке в зависимости от приложенного перпендикулярно к плоскости графена магнитного поля в терагерцевом частотном диапазоне.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве модели поверхностной проводимости ( $\sigma_S(\omega)$ ) монослоя графена было использовано следующее выражение, так как в рассматриваемом частотном диапазоне (от 1 до 10 ТГц) вкладом межзонных переходов ( $\sigma_{\text{inter}}(\omega)$ ) в общую проводимость графена можно пренебречь, так как  $\sigma_{\text{inter}}(\omega) \ll \sigma_{\text{intra}}(\omega)$  [1]:

$$\sigma_S(\omega) \approx \sigma_{\text{intra}}(\omega), \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{intra}}(\omega) = -i \frac{e^2 k T}{\pi (h/2\pi)^2 (\omega - i2\Gamma)} \left( \frac{\mu}{kT} + 2 \ln \left( \exp \left( \frac{-\mu}{kT} \right) + 1 \right) \right) \quad (2)$$

где  $\Gamma$  – частота рассеяния электронов;  $h$  – постоянная Планка;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $e$  – элементарный заряд;  $\omega$  – круговая частота ЭМИ;  $\mu$  – химический потенциал в графене;  $\sigma_{\text{inter}}(\omega)$  – коэффициент межзонной проводимости;  $\sigma_{\text{intra}}(\omega)$  – коэффициент внутризонной проводимости.

Таким образом, оптическая проводимость однослойной графеновой наноструктуры ( $\sigma_{xx}$ ) может быть определена из тензора внутризонной проводимости  $\sigma_{\text{intra}}(\omega)$  и описана в рамках теории Друде в виде [2]:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{e^2 |\mu|}{\pi (h/2\pi)^2} \frac{i(\omega + i/\tau)}{(\omega + i/\tau)^2 - \omega_c^2}, \quad (3)$$

где  $\tau$  – время релаксации электронов в графене;  $\omega_c = eBv_F/\mu$  – круговая частота плазмонов, аналогичная классической циклотронной частоте;  $v_F$  – скорость Ферми электронов в графене (в расчетах  $v_F = 10^6$  м/с).

Уравнения, характеризующие взаимодействие ЭМИ с графеном [3], выводятся из уравнений Максвелла, а дисперсионное соотношение, содержащее коэффициенты поглощения и распространения ЭМИ, из условия нетривиальности решений для таких уравнений [3]:

$$\sqrt{n^2 - \rho^2} + n^2 \sqrt{1 - \rho^2} + \frac{4\pi}{c\epsilon_0} \sigma \sqrt{n^2 - \rho^2} \sqrt{1 - \rho^2} = 0, \quad (4)$$

где  $n$  – показатель преломления на границе среды и образца,  $\rho$  – комплексный коэффициент распространения волны ЭМИ,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\sigma = \sigma_{xx}$  – проводимость однослойной графеновой наноструктуры,  $c$  – скорость света. В расчетах в качестве модели проводимости принято выражение (3), а показатель преломления на границе среды и образца,  $n = 1$ . Таким образом, уравнение (4) можно переписать в виде:

$$\rho = \sqrt{1 - \frac{c^2 \epsilon_0^2}{4\pi^2 \sigma^2}}. \quad (5)$$

Величина коэффициента поглощения ЭМИ определяется в виде  $2\text{Im}(\rho\omega/c)$ , а величина коэффициента распространения (прохождения) ЭМИ определяется в виде  $\text{Re}(\rho)$ .

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рисунке 1 представлены частотные зависимости коэффициентов распространения и поглощения ЭМИ при  $\mu = 0,1$  эВ в магнитных полях от 2 до 10 Т.

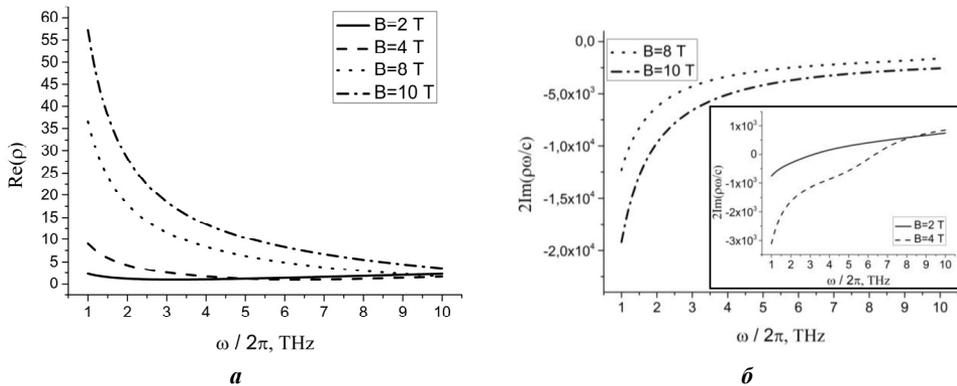


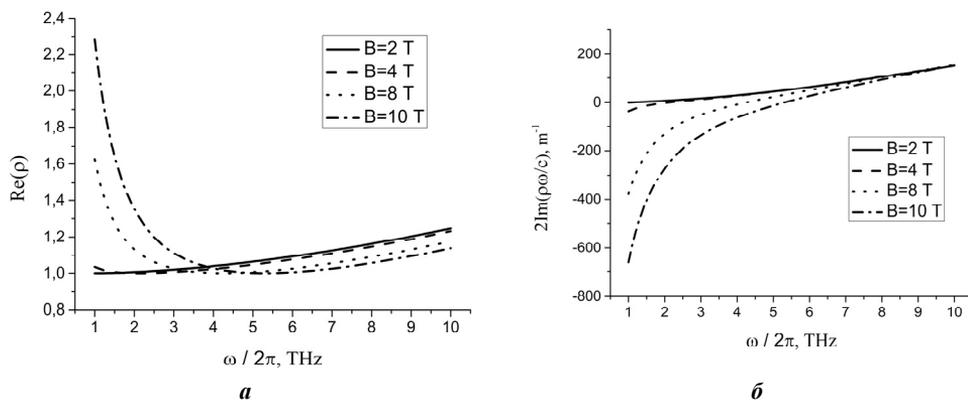
Рисунок 1. – Частотные зависимости а) коэффициента распространения ЭМИ и б) коэффициента поглощения ЭМИ при  $\mu = 0,1$  эВ при различных значениях индукции магнитного поля

Из полученных зависимостей следует, что коэффициент распространения ЭМИ  $\text{Re}(\rho)$  увеличивается с ростом индукции магнитного поля, монотонно убывая с ростом частоты. Коэффициент поглощения ЭМИ  $2\text{Im}(\rho\omega/c)$  существенно изменяется в данном частотном диапазоне, принимая как положительные значения, так и отрица-

тельные, что говорит о реализации как режима поглощения ЭМИ, так и его усиления за счет плазменных колебаний [4].

Как можно видеть из рис. 1 наибольшее влияние магнитное поле оказывает в области 1 ТГц: наблюдается существенный рост коэффициента  $\text{Re}(\rho)$  до почти 60 и отрицательной величины коэффициента  $2\text{Im}(\rho\omega/c)$  до почти  $2 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$  в магнитном поле с индукцией 10 Т. Наоборот, в частотной области 10 ТГц коэффициент  $\text{Re}(\rho)$  снижается до 2–5 и почти не зависит от индукции магнитного поля. Коэффициент поглощения спадает до минус (2–2,5)  $10^3 \text{ м}^{-1}$  в поле с индукцией 8–10 Т, а в поле с индукцией 2–4 Т становится положительным, достигая значений почти  $10^3 \text{ м}^{-1}$ .

На рисунке 2 приведены частотные зависимости коэффициентов распространения и поглощения ЭМИ при  $\mu = 0,3 \text{ эВ}$  в магнитных полях от 2 до 10 Т. В этом случае наблюдается существенное снижение коэффициента распространения до 1,6–2,3 и отрицательной величины коэффициента поглощения до  $-400 \dots -600 \text{ м}^{-1}$  в области 1 ТГц. В области 10 ТГц величина  $\text{Re}(\rho)$  не превышает 1,2 и слабо зависит от индукции магнитного поля, а величина  $2\text{Im}(\rho\omega/c)$  принимает положительное значение  $170 \text{ м}^{-1}$  практически независимо от индукции магнитного поля, рис. 2, б.



**Рисунок 2.** – Частотные зависимости *а)* коэффициента распространения ЭМИ  $\text{Re}(\rho)$  и *б)* коэффициента поглощения ЭМИ  $2\text{Im}(\rho\omega/c)$  при  $\mu = 0,3 \text{ эВ}$  при различных значениях индукции магнитного поля

Таким образом, с увеличением химического потенциала в целом сохраняется качественный вид частотных зависимостей  $\text{Re}(\rho)$  и  $2\text{Im}(\rho\omega/c)$ , но при этом существенно снижается влияние на их величины магнитного поля в области 1 ТГц. В области 10 ТГц рост химического потенциала приводит к положительной величине коэффициента поглощения и потере его зависимости от индукции магнитного поля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное моделирование коэффициентов распространения и поглощения ЭМИ однослойной графеновой наноструктуры в зависимости от химического потенциала и величины приложенного магнитного поля показало, что управлять плазменными эффектами и соответственно электромагнитными параметрами графена можно путем изменения величины магнитного поля, однако его влияние ограничивается частотным диапазоном и химическим потенциалом в графене. Наиболее существенное влияние магнитного поля на коэффициент распространения и отрицательную величину коэффициента поглощения наблюдается в частотном диапазоне вблизи

1 ТГц при значениях химического потенциала около 0,1 эВ. Рост химического потенциала графена и частоты ЭМИ ведет к потере усиления за счет плазмонов. Максимальные значения коэффициента распространения и, соответственно, отрицательного значения коэффициента поглощения достигаются при частоте 1 ТГц, индукции магнитного поля 10 Т, химическом потенциале графена 0,1 эВ, что способствует усилению ЭМИ за счет плазмонов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Plasmonics of coupled graphene micro-structures./ Yan H. [et al.] // New Journal of Physics. – 2012. – V. 14. – №. 12. – P. 125001.
2. Andryieuski, A. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach / A. Andryieuski, A. V. Lavrinenko // Optics express. – 2013. – V. 21. – №. 7. – P. 9144–9155.
3. Dubinov, A. A. Terahertz surface plasmons in optically pumped graphene structures / A. A. Dubinov, V. Mitin, T. Otsuji // J. Phys.: Condens. Matter. – 2011. – Vol. 23, No. 14. – P. 145302.
4. Плазмонные эффекты в графеновой наноструктуре / А. В. Фельшерук // Физика конденсированного состояния : материалы XXVI междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 19 апр. 2018 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак. — Гродно: ГрГУ, 2018. — С. 142–144.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ <011>-ОРИЕНТИРОВАННЫХ НАНОШНУРОВ Si/Ge СО СТРУКТУРАМИ ТИПА ЯДРО-ОБОЛОЧКА И СЕГМЕНТНОГО ТИПА

И. И. Холяво<sup>1</sup>, А. Л. Хомец<sup>1</sup>, И. В. Сафонов<sup>2</sup>, Д. Б. Мигас<sup>1</sup>

---

<sup>1)</sup> *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. Петруся Бровки, 6, 220089 Минск, Беларусь  
e-mail: kholyavo.ivan@gmail.com, e-mail: migas@bsuir.by*

<sup>2)</sup> *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,  
e-mail: safronov@bsu.by*

В работе проведено исследование влияния границы раздела нанощнуров Si и Ge с ориентацией <011> и диаметром около 5 нм на их теплопроводность с помощью метода неравновесной молекулярной динамики, реализованного в пакете LAMMPS. Обнаружено, что для нанощнуров Si-ядро/Ge-оболочка возможно достичь коэффициента теплопроводности менее 10 Вт/(м·К), и для нанощнуров сегментного типа 2 Вт/(м·К), в то время как значения теплопроводности для нанощнуров из чистого Si и Ge составляют соответственно 19,1 и 11,4 Вт/(м·К). Учет эффекта перемешивания атомов на границе раздела приводит к снижению теплопроводности.

**Ключевые слова:** нанощнур; кремний; германий; граница раздела; теплопроводность.