



УДК 621.315.592

ПЛАЗМОННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГРАФЕНОВОЙ СТРУКТУРЕ С ДВОЙНЫМ РЕШЕТОЧНЫМ ЗАТВОРОМ

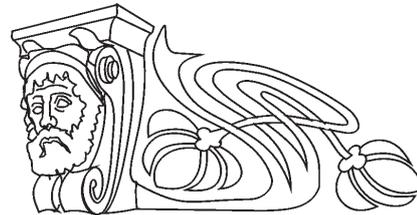
К. В. Машинский¹, Д. В. Фатеев², В. В. Попов^{1,2}

¹Саратовский государственный университет

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники

им. В. А. Котельникова РАН

E-mail: konstantin-m92@yandex.ru



Разработана теория плазмонного детектирования терагерцового излучения в графене с металлическим решеточным затвором с асимметричной элементарной ячейкой.

Ключевые слова: плазмон, детектирование, терагерцовое излучение, графен, плазмонное увлечение, фотогальванический ток.

Plasmonic Rectification of Terahertz Radiation in a Grating-gated Graphene

K. V. Mashinsky, D. V. Fateev, V. V. Popov

The theory of the plasmonic rectification of terahertz radiation in a homogeneous graphene gated by a metal grating with an asymmetric unit cell is developed.

Key words: plasmon, rectification, terahertz, graphene, plasmon drag, photovoltaic current.

DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-4-10-12

Введение

В последнее время интенсивно изучается плазмонное детектирование терагерцового (ТГц) излучения в двумерных электронных системах (2МЭС) с периодическим решеточным затвором (см. обзор [1]). Известно, что плазмонное детектирование в полупроводниковых гетероструктурах с 2МЭС происходит за счет эффекта плазмонного хвора и/или эффекта увлечения электронов плазменной волной [2]. Рекордные значения чувствительности детектирования ТГц излучения были получены в транзисторной структуре с высокой подвижностью электронов с двойным решеточным затвором [3] за счет возбуждения плазмонов с сильной пространственной асимметрией электрического поля [4]. Однако вследствие малых значений времени рассеяния импульса электронов в полупроводниковых гетероструктурах резонансный режим детектирования ТГц излучения остается трудно реализуемым. Перспективным двумерным материалом с точки зрения возбуждения высококачественных плазменных колебаний является графен. Графен представляет собой естественную

2МЭС, обладающую сильными плазмонными нелинейностями [5], некоторые из которых существенно отличаются от существующих в традиционных 2МЭС.

В данной работе развита теория плазмонного детектирования ТГц излучения в графене с металлическим решеточным затвором с асимметричной элементарной ячейкой. Выпрямленный ток вычислен путем решения гидродинамических уравнений для носителей заряда в графене [6] с применением метода теории возмущений [7].

1. Теоретическая модель

Рассмотрим однородный моноатомный слой графена, экранированный двойным периодическим решеточным затвором. Графен расположен на поверхности подложки из SiO_2 и отделен от затворной решетки слоем подзатворного диэлектрика Al_2O_3 (рис. 1). Для внесения асимметрии в элементарную ячейку периодической структуры, металлические электроды разных подрешеток затвора смещены друг относительно друга в плоскости затвора. Внешняя ТГц волна с угловой частотой ω и электрическим полем, поляризованным поперек электродов затворной решетки, падает на структуру (сверху на рис. 1) по нормали к плоскости графенового слоя.

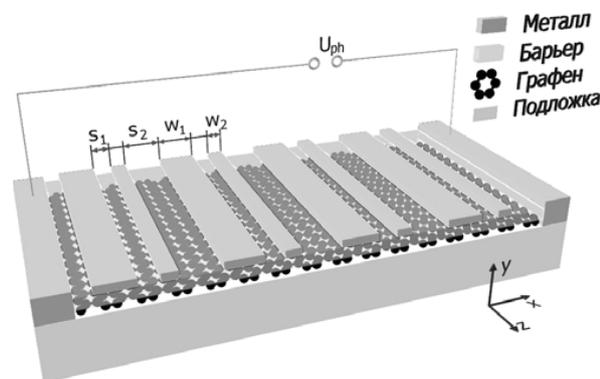


Рис. 1. Схематическое изображение графеновой структуры с двойным решеточным затвором



Дифрагируя на решеточном затворе, внешняя ТГц волна возбуждает плазменные колебания в графене. Движение электронов в плазменной волне описывается гидродинамическими уравнениями:

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial n(x,t)v(x,t)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + v(x,t)\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + \frac{v(x,t)}{\varepsilon_F(x,t)}\frac{\partial \varepsilon_F(x,t)}{\partial t} = \\ = \frac{ev_F^2}{\varepsilon_F(x,t)}E(x,t) - \frac{v(x,t)}{\tau}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $n(x,t)$ и $v(x,t)$ – соответственно осциллирующая концентрация носителей заряда в графене и их гидродинамическая скорость, $\varepsilon_F(x,t)$ – осциллирующая энергия Ферми в графене, $E(x,t)$ – компонента плазмонного электрического поля в плоскости графена, $v_F = 10^8$ см/с – скорость Ферми в графене, e – элементарный заряд ($e < 0$ для электронов и $e > 0$ для дырок), τ – время релаксации импульса носителей заряда. Уравнения (1) и (2) получены из уравнений работы [6] в пределе малых скоростей носителей заряда $v(x,t) < v_F$ при нулевой температуре. В этом случае импульс носителя заряда в графене определяется выражением

$$p(x,t) = -\text{sgn}(e)\frac{\varepsilon_F(x,t)}{v_F^2}v(x,t).$$

Гидродинамические уравнения (1) и (2) решались методом теории возмущений [7] путем разложения скорости носителей заряда и энергии Ферми по степеням амплитуды действующего на заряды электрического поля, с учетом только линейных и квадратичных членов в ряде теории возмущений. В данном приближении индуцированная плотность тока в графене определяется выражением $j(x,t) = en_0v_1(x,t) + en_1(x,t)v_1(x,t)$, где n_0 – равновесная плотность носителей заряда, $n_1(x,t)$ и $v_1(x,t)$ – линейные поправки соответственно к плотности и скорости носителей заряда в графене.

Используя гармоническую зависимость электрического поля от времени $E(x,t) = E(x)\exp(-i\omega t)$, получаем проводимость графена в первом (линейном) порядке теории возмущений

$$\sigma(\omega) = -\text{sgn}(e)\frac{e^2\tau\varepsilon_F^{(0)}}{\pi\hbar^2(1-i\omega\tau)}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_F^{(0)}$ – равновесная энергия Ферми. Проводимость графена (3) может быть записана в

форме Друде с использованием выражения для коллективной динамической массы носителей заряда в графене $m_F = -\text{sgn}(e)\varepsilon_F^{(0)}/v_F^2$ [8] и связи равновесной энергии Ферми с плотностью носителей заряда в графене $\varepsilon_F^{(0)} = -\text{sgn}(e)\hbar v_F\sqrt{\pi n_0}$ [5]. Усреднение индуцированного тока по времени $j(x,t)$ во втором порядке теории возмущений дает плотность выпрямленного тока в графене

$$j_0 = -\frac{e^3\tau^2v_F^2}{2\pi\hbar^2\omega(\tau^2\omega^2+1)}\sum_{l=1}^{\infty}q_l(|E_l|^2 - |E_{-l}|^2), \quad (4)$$

где E_l – амплитуды пространственных Фурье-гармоник электрического поля плазмона $E(x)$, $q_l = 2\pi l/L$ и l – целые числа. Из уравнения (4) следует, что разностный постоянный фототок существует только в случае различия амплитуд пространственных Фурье-гармоник электрического поля одного порядка $E_l \neq E_{-l}$. Направление выпрямленного тока зависит от типа проводимости в графене (электронной или дырочной). Выражение (4) может быть записано в форме, точно совпадающей с видом этого уравнения для тока плазмонного увлечения в обычной 2МЭС [4] при использовании коллективной динамической массы и равновесной плотности носителей заряда в графене. Однако необходимо отметить, что в отличие от обычных 2МЭС коэффициент перед суммой в уравнении (4) не зависит от равновесной плотности носителей заряда в графене.

2. Результаты и их обсуждение

Плазмонное электрическое поле в графеновой структуре с двойным решеточным затвором, индуцированное падающей ТГц волной, вычислялось в рамках самосогласованного электродинамического подхода [9] с использованием выражения для проводимости графена (3). Расчеты выполнены для структуры с параметрами: $w_1 = 0.5$ мкм, $w_2 = 1$ мкм, $s_1 = 0.5$ мкм, $s_2 = 1$ мкм, $\tau = 5$ пс. На рис. 2 показаны основной и высшие плазмонные резонансы выпрямленного тока и коэффициента поглощения падающей ТГц волны в графеновой структуре с двойным решеточным затвором как функцию от частоты плазмона для двух разных времен релаксации импульса электронов в графене. Эквидистантный спектр возбуждения плазмонных резонансов в структуре, показанный на рис. 2, свидетельствует о возбуждении плазмонных мод с линейной



дисперсией, что характерно для подзатворных плазмонных мод [4]. Асимметричная форма резонансной кривой на рис. 2, б на частоте 2.5 ТГц связана с одновременным возбуждением двух плазмонных мод на подзатворных участках разных затворных подрешеток. Известно, что взаимодействие различных плазмонных мод может приводить к сильной асимметрии плазмонного поля в 2МЭС с двойным решеточным затвором и асимметричной элементарной ячейкой [4].

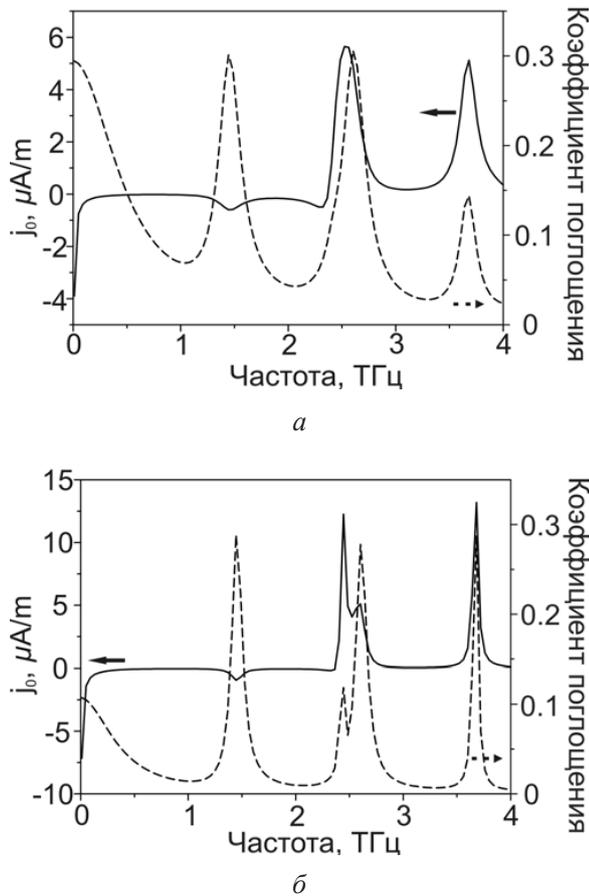


Рис. 2. Плотность выпрямленного тока j_0 и коэффициент поглощения в графене при времени релаксации импульса электрона (а) $\tau = 10^{-12}$ с и (б) $\tau = 5 \cdot 10^{-12}$ с

Как следует из выражения (4), выпрямленный ток растет с увеличением волнового вектора плазмонной моды (т.е. с ростом номера плазмонного резонанса на рис. 2), а его знак означает направление распространения плазменной волны в рассматриваемой структуре. Положительный знак фототока в графене с электронной проводимостью соответствует распространению плазменной волны вдоль оси x . Кроме того, к дополнительному увеличению выпрямленного тока приводит

усиление асимметрии плазмонного поля при антипересечении различных плазмонных мод на частоте около 2.5 ТГц (см. рис. 2).

Заключение

Разработана теория плазмонного детектирования ТГц излучения в однородном графене с решеточным затвором. Показано, что в однородном графене выпрямленный ток появляется в результате дифференциального плазмонного увлечения в графене.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-02-02989).

Список литературы

1. Popov V. V. Plasmon Excitation and Plasmonic Detection of Terahertz Radiation in the Grating-Gate Field-Effect-Transistor Structures // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2011. Vol. 32. P. 1178.
2. Popov V. V. Terahertz rectification by periodic two-dimensional electron plasma // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102. P. 253504.
3. Watanabe T., Boubanga-Tombet S. A., Tanimoto Y., Fateev D., Popov V., Coquillat D., Knap W., Meziani Y. M., Wang Y., Minamide H., Ito H., Otsuji T. InP- and GaAs-Based Plasmonic High-Electron-Mobility Transistors for Room-Temperature Ultrahigh-Sensitive Terahertz Sensing and Imaging // IEEE Sensors Journal. 2013. Vol. 13 (1). P. 89.
4. Popov V. V., Fateev D. V., Ivchenko E. L., Ganichev S. D. Noncentrosymmetric plasmon modes and giant terahertz photocurrent in a two-dimensional plasmonic crystal // Phys. Rev. B. 2015. Vol. 91. P. 235436.
5. Mikhailov S. A., Ziegler K. Nonlinear electromagnetic response of graphene: frequency multiplication and the self-consistent-field effects // J. Phys. : Condens. Matter. 2008. Vol. 20. P. 384204.
6. Rudin S. Non-linear plasma oscillations in semiconductor and Graphene channels and application to the detection of Terahertz signals // Intern. J. High Speed Electron. and Systems. 2011. Vol. 20 (3). P. 567.
7. Aizin G. R., Fateev D. V., Tsybmalov G. M., Popov V. V. Terahertz plasmon photoresponse in a density modulated two-dimensional electron channel of a GaAs/AlGaAs field-effect transistor // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. P. 163507.
8. Svintsov D., Kyurkov V., Ryzhii V., Otsuji T. Hydrodynamic electron transport and nonlinear waves in graphene // Phys. Rev. B. 2013. Vol. 88. P. 245444.
9. Fateev D. V., Popov V. V., Shur M. S. Transformation of the plasmon spectrum in a grating-gate transistor structure with spatially modulated two-dimensional electron channel // Semiconductors. 2010. Vol. 44 (11). P. 1406.