



ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.315.592

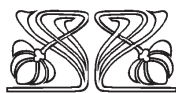
Детектирование терагерцового излучения в графеновой структуре в условиях сильной пространственной неоднородности электрического поля плазмона

К. В. Машинский, Д. В. Фатеев, В. В. Попов

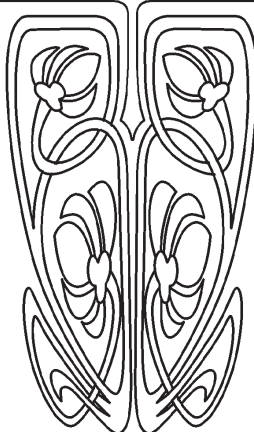
Машинский Константин Викторович, младший научный сотрудник лаборатории фотоники, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, konstantin-m92@yandex.ru

Фатеев Денис Васильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории фотоники, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН; доцент кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, fateevdv@yandex.ru

Попов Вячеслав Валентинович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, glorvv@gmail.com



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Теоретически исследовано детектирование терагерцового излучения в пространственно-периодической структуре с пространственно-неоднородным графеном. Для создания пространственной асимметрии и неоднородности графен в каждой элементарной ячейке экранирован двумя металлическими электродами разной ширины и однородным экраном снизу. За счет приложения постоянных электрических напряжений между различными затворными электродами и графеном в элементарной ячейке периодического графена создаются области с электронной и дырочной проводимостями. Решены электродинамическая задача о возбуждении плазмонов в графеновой структуре падающей терагерцовой волной, электростатическая задача о вычислении концентрации носителей в графене в зависимости от установленных напряжений на различных затворах и нелинейная гидродинамическая задача динамики носителей заряда о вычислении выпрямленного тока, индуцированного плазменной волной, в пространственно-периодическом графене. В такой графеновой системе доминирующим механизмом детектирования терагерцового излучения является эффект плазмонного электронно-дырочного храповика. Обнаружено, что выпрямленный ток за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного храповика растет с увеличением пространственной неоднородности электрического поля плазмона в графене.

Ключевые слова: плазмон, детектирование, терагерцовое излучение, графен, плазмонный храповик.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-2-140-145>

Введение

Исследование выпрямления терагерцовых (ТГц) волн в графене показывает увеличение выпрямленного тока в p - n графеновых структурах относительно графена, имеющего только n - или p -тип



проводимости [1]. Участки *p-n* переходов в графене могут быть созданы как химическим, так и электрическим легированием графена [2, 3]. В литературе исследуются следующие физические механизмы выпрямления волн в графеновых структурах: фототермоэлектрический эффект [4], Друде-нагрев носителей ТГц-излучением [5] и нелинейные плазмонные эффекты [6, 7].

В данной работе обсуждаются новые способы увеличения эффективности выпрямления ТГц излучения за счет нелинейных плазмонных эффектов в графене, а именно: влияние сильной пространственной неоднородности электрического поля на плазмонное детектирование терагерцового излучения в графеновой структуре с двойным решеточным затвором.

1. Методы исследования

Рассматриваемая графеновая структура (рис. 1) состоит из графена, размещенного на поверхности диэлектрического слоя (SiO_2) толщиной 300 нм, который расположен на проводящей подложке. Над графеном находится металлический двойной решеточный затвор, отделенный от графена изолирующим слоем (Al_2O_3) толщиной

26 нм. Электроды подрешеток затвора смещены относительно друг друга в плоскости в направлении периодичности с целью создания асимметрии элементарной ячейки периодической структуры. Приложенные постоянные напряжения между электродами решетки и графеном, а также между проводящей подложкой и графеном позволяют контролировать плотность носителей заряда в различных участках графена. Приложенные напряжения могут изменять энергию Ферми носителей заряда в графене таким образом, что части графена могут иметь как электронную, так и дырочную проводимость. Нормально падающая на структуру ТГц электромагнитная волна, электрическое поле которой поляризовано поперек полосок решетки, возбуждает высшие пространственные гармоники решетки, которые, в свою очередь, возбуждают плазмонные моды в графене. Нелинейные свойства динамики носителей заряда в графене приводят к возникновению выпрямленного электрического тока, текущего в направлении поляризации падающей волны. Этот эффект усиливается при возбуждении плазмонных резонансов в периодической графеновой структуре.

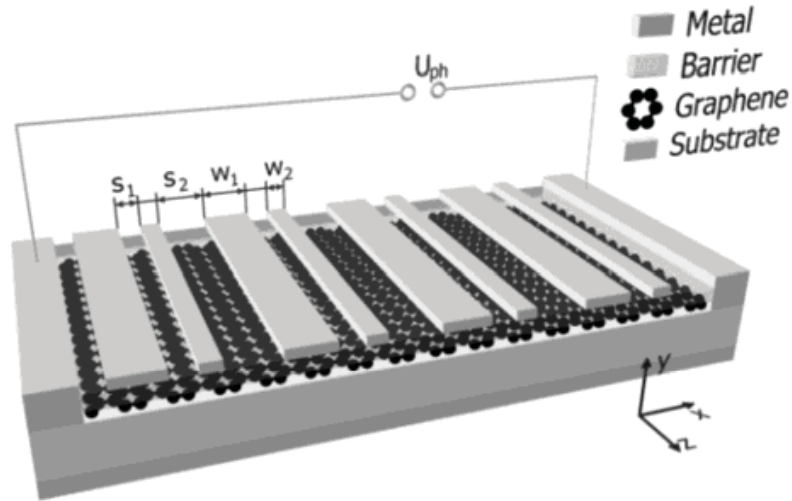


Рис. 1. Схематическое изображение графеновой структуры с двойным решеточным затвором с нижним затвором

Fig 1. Schematic view of the dual-grating gate graphene structure with back gate

Для описания нелинейной динамики носителей заряда в графене методом теории возмущений решены уравнения гидродинамики: уравнение непрерывности и уравнение баланса импульса носителей заряда [6]

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(NV)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial(\epsilon_F V)}{\partial t} + V \frac{\partial(\epsilon_F V)}{\partial x} = -|e|v_F^2 E_x - \gamma \epsilon_F V, \end{cases} \quad (1)$$



где $E_{x,\omega}(x,t)$ – компонента электрического поля плазмона в плоскости графена, $V(x,t)$ и $N(x,t)$ – гидродинамические скорость носителей заряда и их концентрация, ε_F и v_F – энергия и скорость Ферми носителей заряда в графене, e – элементарный заряд ($e < 0$ для электронов и $e > 0$ для дырок), γ – скорость релаксации импульса. Правоприменимость гидродинамического подхода для описания коллективных плазмонных явлений в терагерцовом частотном диапазоне рассмотрена, например, в работе [8].

$$\sigma(\omega) = \frac{e^2 2k_B T}{\pi \hbar (\gamma - i\omega)} \ln \left(2 \operatorname{ch} \left(\frac{\varepsilon_F}{2k_B T} \right) \right) + \frac{e^2}{4\hbar} G \left(\frac{\hbar\omega}{2} \right) - \frac{e^2 \omega}{i\pi} \int_0^\infty \frac{G(\varepsilon) - G(\hbar\omega/2)}{(\hbar\omega)^2 - 4\varepsilon^2} d\varepsilon, \quad (2)$$

$$G(\xi) = \frac{\operatorname{sh} \left(\frac{\xi}{k_B T} \right)}{\operatorname{ch} \left(\frac{\varepsilon_F}{k_B T} \right) + \operatorname{ch} \left(\frac{\xi}{k_B T} \right)},$$

где ω – частота падающей ТГц волны, k_B – постоянная Больцмана, \hbar – постоянная Планка, $T = 300$ К – температура. Равновесное пространственное распределение энергии Ферми носителей заряда в элементарной ячейке графена получено путем решения электростатических уравнений с учетом эффекта квантовой емкости графена [11].

$$j_0 = - \frac{|e^3| v_F^2}{2\hbar \pi \omega \gamma (\omega^2 + \gamma^2)} \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \operatorname{sgn}(e(x)) \operatorname{Re} \left[\left(\omega - i \frac{\gamma}{2} \right) E_{x,\omega}(x) \frac{\partial (E_{x,\omega}(x))^*}{\partial x} \right] dx, \quad (3)$$

где L – пространственный период структуры, $E_{x,\omega}(x)$ – амплитуда электрического поля плазмона в плоскости графена. Детектирование ТГц излучения в периодической структуре графена может происходить за счет двух различных физических механизмов. Одним из физических механизмов является выпрямление ТГц излучения за счет эффекта дифференциального увлечения плазмонных носителей в графене [12]. Другой механизм выпрямления ТГц излучения – это эффект плазмонного электронно-дырочного храповика. Эффект плазмонного храповика возникает в пространственно-периодическом графене, когда нелинейные стационарные токи электронной конвекции противоположного направления, возникающие в графене благодаря пространственной асимметрии электрического поля плазмона, перестают уравновешивать друг друга [13]. Выпрямление

Электрические поля плазмонов в структуре графена вычислялись с использованием самосогласованного электродинамического подхода, основанного на решении интегральных уравнений, формируемых относительно колеблющихся токов на проводящих элементах элементарной ячейки структуры графена [9]. Для описания линейного отклика графена на ТГц осциллирующее электрическое поле использовались выражения для проводимости графена [10]

Решение гидродинамических уравнений движения носителей заряда в графене (1) методом теории возмущений, путем разложения энергии носителей заряда, их скорости и плотности электрического тока по степеням действующего электрического поля позволяет получить выражение для расчета выпрямленного тока в структуре графена [6]:

ТГц излучения за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного храповика возможно только в том случае, если разные участки графена в элементарной ячейке имеют разные типы проводимости [6]. Такое распределение зарядов в элементарной ячейке периодической структуры графена может быть достигнуто приложением различных постоянных потенциалов к различным затворам структуры. Тогда элементарная ячейка графеновой структуры будет иметь n - p - n переход. В этом случае в ТГц диапазоне частот доминирует эффект плазмонного электронно-дырочного храповика. Раскладывая электрические поля в периодической системе в пространственный ряд Фурье и используя выражение (3), можно получить выражение для вычисления выпрямленного тока за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного храповика



$$j_0^{rt} = -\frac{|e^3|v_F^2}{\hbar^2\pi\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \frac{4}{\gamma L} [\text{sgn}(e_1) - \text{sgn}(e_2)] \times \text{Re} \left[\left(i\omega + \frac{\gamma}{2} \right) \sum_p \sum_{p \neq p'} E_{x,\omega,p} E_{x,\omega,p'}^* \frac{p'}{p-p'} \sin \left(\pi(p-p') \frac{w_2}{L} \right) \exp \left(i\pi(p-p') \frac{s_1 - s_2}{L} \right) \right], \quad (4)$$

где $E_{x,\omega,p}$ – пространственная Фурье-гармоника электрического поля $E_{x,\omega}$, (p – целое число), e_2 – заряд носителей в графене под затвором w_2 , e_1 – заряд носителей в остальной части элементарной ячейки графеновой структуры. Вместе с зависимостью от геометрической асимметрии структуры графена результирующий выпрямленный ток (4) зависит от неоднородности плазмонного электрического поля в графене в соответствии с фактором $\sum_p \sum_{p \neq p'} E_{x,\omega,p} E_{x,\omega,p'}^*$.

2. Результаты и их обсуждение

Расчеты выпрямленного тока выполнены для структуры графена с двойным решеточным затвором с параметрами: $w_1 = 1$ мкм, $w_2 = 0.25$ мкм, $s_1 = 0.625$, $s_2 = 0.125$, напряжение на нижнем затворе $U_{bg} = 40$ В, напряжение на подрешетке $w_1 - U_{w1} = 1$ В и $\tau = 1$ пс.

Выпрямленный ток, вычисленный с помощью выражения (3), растет вблизи плазмонного резонанса в графеновой структуре (рис. 2). Выбранный набор постоянных напряжений на затворах U_{bg} и U_{w1} создает электронный тип проводимости в элементарной ячейке структуры за исключением части графена под затвором w_2 . Повышение постоянного напряжения U_{w2} изменяет равнове-

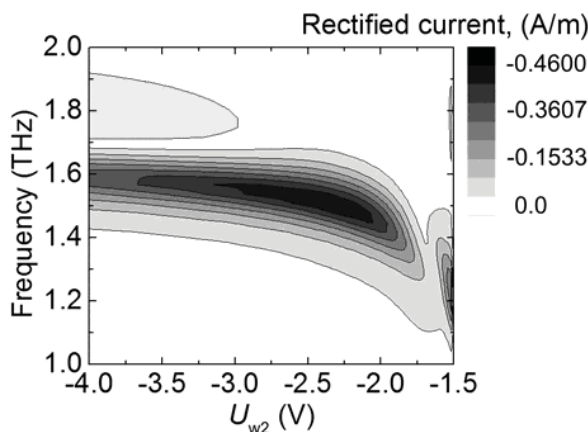


Рис. 2. Зависимость выпрямленного тока от частоты и постоянного напряжения U_{w2} между подрешеткой w_2 и графеном

Fig. 2. Dependence of the rectified current on the frequency and dc gate voltage U_{w2} at the sub grating w_2

ную концентрацию носителей заряда в участках графена, расположенных под полосками решетки w_2 , что приводит к изменению спектрального состава (рис. 3) возбуждаемой плазмонной моды в графеновой структуре. Растущее количество и амплитуда значимых в вычислениях Фурье-гармоник электрического поля свидетельствуют о росте пространственной неоднородности электрического поля плазмона в графене. Тем самым происходит рост выпрямленного тока за счет эффекта плазмонного электронно-дырочного хвора в соответствии с выражением (4) (см. рис. 2).

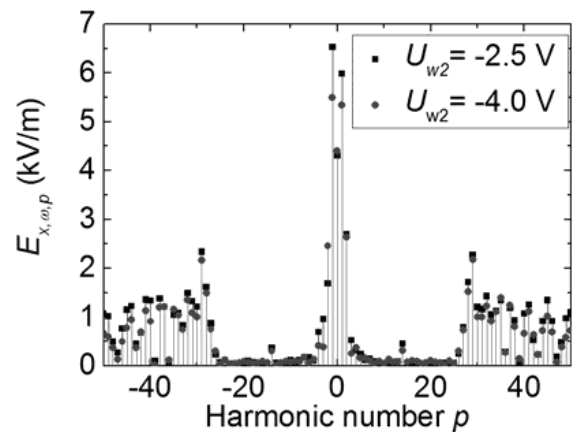


Рис. 3. Спектральный состав возбужденной плазмонной моды в графеновой структуре на частоте 1.537 ТГц для различных затворных напряжений U_{w2}

Fig. 3. Spectral composition of the excited plasmon mode of the graphene structure at frequency 1.537 THz for different gate voltages U_{w2}

Заключение

В данной работе выяснено, что возбуждение плазмонных мод с сильно неоднородным электрическим полем приводит к повышению эффективности детектирования за счет плазмонного электронно-дырочного хвора в графене.

Список литературы

1. Alonso-González P., Nikitin A. Y., Gao Y., Woessner A., Lundberg M. B., Principi A., Forcellini N., Yan W., Vélaz S., Huber A. J., Watanabe K., Taniguchi T., Casa-



- nova F., Hueso L. E.* Acoustic terahertz graphene plasmons revealed by photocurrent nanoscopy // *Nature Nanotechnology*. 2017. Vol. 12. P. 31–36. DOI: 10.1038/NNANO.2016.185
2. *Williams J. R., DiCarlo L., Marcus C. M.* Quantum hall effect in a gate-controlled *p-n* junction of graphene // *Science*. 2007. Vol. 317. P. 638–641. DOI: 10.1126/science.1144657
 3. *Lohmann T., von Klitzing K., Smet J. H.* Four-terminal magneto-transport in graphene *p-n* junctions created by spatially selective doping // *Nano Letters*. 2009. Vol. 9. P. 1973–1979. DOI: 10.1021/nl900203n
 4. *Koppens F. H. L., Mueller T., Avouris P., Ferrari A. C., Vitiello M. S., Polini M.* Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems // *Nature Nanotechnology*. 2014. Vol. 9. P. 780–793. DOI: 10.1038/NNANO.2014.215
 5. *Freitag M., Low T., Avouris Ph.* Increased responsivity of suspended graphene photodetectors // *Nano Letters*. 2013. Vol. 13. P. 1644–1649. DOI: 10.1021/nl4001037
 6. *Fateev D. V., Mashinsky K. V., Popov V. V.* Terahertz plasmonic rectification in a spatially periodic graphene // *Applied Physics Letters*. 2017. Vol. 110. P. 061106. DOI: 10.1063/1.4975829
 7. *Машинский К. В., Фатеев Д. В., Попов В. В.* Плазмонное детектирование терагерцового излучения в графеновой структуре с двойным решеточным затвором // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2015. Т. 15, вып. 4. С. 10–12. DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-4-10-12
 8. *Tomadin A., Polini M.* Theory of the plasma-wave photoresponse of a gated graphene sheet // *Phys. Rev. B*. 2013. Vol. 88. P. 205426. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.205426
 9. *Полищук О. В., Фатеев Д. В., Попов В. В.* Усиление терагерцового излучения в плазмонной *n-i-p-i*-структуре на основе графена с инжекцией носителей заряда // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51, вып. 11. С. 1514–1519. DOI: 10.21883/FTP.2017.11.45102.16
 10. *Falkovsky L. A., Varlamov A. A.* Space-time dispersion of graphene conductivity // *The European Physical Journal B*. 2007. Vol. 56, iss. 4. P. 281–284. DOI: 10.1140/epjb/e2007-00142-3
 11. *Liu M.-H.* Theory of carrier density in multigated doped graphene sheets with quantum correction // *Phys. Rev. B*. 2013. Vol. 87. P. 125427. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.125427
 12. *Olbrich P., Kamann J., Konig M., Munzert J., Tutsch L., Eroms J., Weiss D., Liu M.-H., Golub L. E., Ivchenko E. L., Popov V. V., Fateev D. V., Mashinsky K. V., Fromm F., Seyller T., Ganichev S. D.* Terahertz ratchet effects in graphene with a lateral superlattice // *Phys. Rev. B*. 2016. Vol. 93. P. 075422. DOI: 10.1103/PhysRevB.93.075422
 13. *Popov V. V.* Terahertz rectification by periodic two-dimensional electron plasma // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. P. 253504. DOI: 10.1063/1.4811706

Образец для цитирования:

Машинский К. В., Фатеев Д. В., Попов В. В. Детектирование терагерцового излучения в графеновой структуре в условиях сильной пространственной неоднородности электрического поля плазмона // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2019. Т. 19, вып. 2. С. 140–145. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-2-140-145>

Detection of Terahertz Radiation in Graphene Structure under Conditions of Strong Spatial Inhomogeneity of the Plasmon Electric Field

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

Konstantin V. Mashinsky, <https://orcid.org/0000-0002-0724-6391>, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya St., Saratov 410019, Russia, fateevdv@yandex.ru

Denis V. Fateev, <https://orcid.org/0000-0003-1406-5385>, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya St., Saratov 410019, Russia, fateevdv@yandex.ru

Viacheslav V. Popov, <https://orcid.org/0000-0003-1303-6443>, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya St., Saratov 410019, Russia, glorvv@gmail.com

Background and Objectives: Research of terahertz (THz) wave rectification in graphene shows the increase of the rectified current in *p-n* graphene structures relatively to graphene having only *n*- or *p*-type of conductivity. The *p-n* junctions in graphene may be created

by both a chemical or electrical doping of graphene. There were discussed several physical mechanisms for wave rectification in graphene structures, that are the photothermoelectric effect, Drude heating of carriers by THz radiation and nonlinear plasmonic effects. **Methods:** The detection of terahertz radiation in a spatially periodic structure with spatially inhomogeneous graphene is theoretically investigated. To create spatial asymmetry and inhomogeneity, graphene in each unit cell is screened by two metal electrodes with different widths and a uniform gate at the bottom. Due to the application of dc electrical voltages between the different gate electrodes and graphene in the unit cell of periodic graphene the areas with electron and hole conductivities are created. We solved the electromagnetic problem of plasmon excitation in the graphene structure by an incident terahertz wave, the electrostatic problem of calculating the carrier density in graphene depending on the set dc voltages at different gates, and the nonlinear hydrodynamic problem of charge carrier dynamics on calculating the rectified current induced by the plasma wave in spatially periodic graphene. **Results:** In such a graphene system, the dominant mechanism for detecting terahertz radiation is the plasmon electron-hole ratchet effect. It has been found that due to the effect of the plasmon electron-hole ratchet, the rectified current increases with increasing spatial inhomogeneity of the electric field of plasmon in graphene.

Key words: plasmon, rectification, terahertz radiation, graphene, plasmon ratchet.



References

1. Alonso-González P., Nikitin A. Y., Gao Y., Woessner A., Lundeberg M. B., Principi A., Forcellini N., Yan W., Vézé S., Huber A. J., Watanabe K., Taniguchi T., Casanova F., Hueso L. E. Acoustic terahertz graphene plasmons revealed by photocurrent nanoscopy. *Nature Nanotechnology*, 2017, vol. 12, pp. 31–36. DOI: 10.1038/NNANO.2016.185
2. Williams J. R., DiCarlo L., Marcus C. M. Quantum hall effect in a gate-controlled p - n junction of graphene. *Science*, 2007, vol. 317, pp. 638–641. DOI: 10.1126/science.1144657
3. Lohmann T., von Klitzing K., Smet J. H. Four-terminal magneto-transport in graphene p - n junctions created by spatially selective doping. *Nano Letters*, 2009, vol. 9, pp. 1973–1979. DOI: 10.1021/nl900203n
4. Koppens F. H. L., Mueller T., Avouris P., Ferrari A. C., Vitiello M. S., Polini M. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems. *Nature Nanotechnology*, 2014, vol. 9, pp. 780–793. DOI: 10.1038/NNANO.2014.215
5. Freitag M., Low T., Avouris Ph. Increased responsivity of suspended graphene photodetectors. *Nano Letters*, 2013, vol. 13, pp. 1644–1649. DOI: 10.1021/nl4001037
6. Fateev D. V., Mashinsky K. V., Popov V. V. Terahertz plasmonic rectification in a spatially periodic graphene. *Applied Physics Letters*, 2017, vol. 110, pp. 061106. DOI: 10.1063/1.4975829
7. Mashinsky K. V., Fateev D. V., Popov V. V. Plasmonic rectification of terahertz radiation in a grating-gated graphene. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2015, vol. 15, iss. 4, pp. 10–12 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-4-10-12
8. Tomadin A., Polini M. Theory of the plasma-wave photoresponse of a gated graphene sheet. *Phys. Rev. B*, 2013, vol. 88, pp. 205426. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.205426
9. Polischuk O. V., Fateev D. V., Popov V. V. Amplification of terahertz radiation in a plasmon n - i - p - i graphene structure with charge-carrier injection. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 11, pp. 1460–1465. DOI: 10.1134/S1063782617110240
10. Falkovsky L. A., Varlamov A. A. Space-time dispersion of graphene conductivity. *The European Physical Journal B*, 2007, vol. 56, iss. 4, pp. 281–284. DOI: 10.1140/epjb/e2007-00142-3.
11. Liu M.-H. Theory of carrier density in multigated doped graphene sheets with quantum correction. *Phys. Rev. B*, 2013, vol. 87, pp. 125427. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.125427
12. Olbrich P., Kamann J., König M., Munzert J., Tutsch L., Eroms J., Weiss D., Liu M.-H., Golub L. E., Ivchenko E. L., Popov V. V., Fateev D. V., Mashinsky K. V., Fromm F., Seyller T., Ganichev S. D. Terahertz ratchet effects in graphene with a lateral superlattice. *Phys. Rev. B*, 2016, vol. 93, pp. 075422. DOI: 10.1103/PhysRevB.93.075422
13. Popov V. V. Terahertz rectification by periodic two-dimensional electron plasma. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 102, pp. 253504. DOI: 10.1063/1.4811706

Cite this article as:

Mashinsky K. V., Fateev D. V., Popov V. V. Detection of Terahertz Radiation in Graphene Structure under Conditions of Strong Spatial Inhomogeneity of the Plasmon Electric Field. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 2, pp. 140–145 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-2-140-145>