

## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ГРАФЕН/КРЕМНИЙ К ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

А.Г. Трафименко, А.Л. Данилюк, С.Л. Прищепа  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь,  
evdokimovithi@gmail.com, danilyuk@bsuir.by, prischepa@bsuir.by

Представлены результаты моделирования электрофизических параметров гетероструктуры графен/кремний n-типа при облучении солнечным светом: напряжение холостого хода, концентрация электронов и квантовая емкость графена в зависимости от интенсивности излучения. Установлен эффект стабилизации параметров графена при снижении интенсивности излучения при условии ограничения тока генерированных светом дырок в объеме кремния. Показано, что эффект проявляется при работе выхода графена не более 4.8 эВ и плотности тока дырок в объеме кремния не более 1-2.5 мА/см<sup>2</sup>. Эффект объясняется стабилизацией напряжения холостого хода и обусловлен эффективным разделением неравновесных носителей заряда в обедненном слое кремния.

**Ключевые слова:** гетероструктура; графен; кремний; фотодетектор; солнечное излучение.

## SENSITIVITY OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS GRAPHENE / SILICON HETEROSTRUCTURE TO RADIATION INTENSITY

A.G. Trafimenko, A.L. Danilyuk, S.L. Prischepa  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
6 P. Browka Str., 220013 Minsk, Belarus,  
evdokimovithi@gmail.com, danilyuk@bsuir.by, prischepa@bsuir.by

The results of modeling the electrophysical parameters of the graphene/n-type silicon heterostructure under solar irradiation are presented: the open circuit voltage, electron concentration and quantum capacitance of graphene, depending on the radiation intensity and the graphene work function. The dependences of the open circuit voltage, electron concentration in graphene, and its quantum capacitance on the radiation intensity and the graphene work function are calculated using the developed model for the case of the absence of the total current in the graphene/silicon heterostructure when exposed to sunlight. The effect of stability of the open circuit voltage and the electrophysical parameters of graphene with a decrease in the radiation intensity by more than 10 times is established, provided that the current density of holes in the silicon volume does not exceed 1-2.5 mA/cm<sup>2</sup>. With an increase in the current density of holes in the volume of silicon, the range of stabilization of the open circuit voltage and graphene parameters decreases and at a current density of holes in the volume of silicon of 20 mA/cm<sup>2</sup> is only 25 % of the maximum radiation intensity. It is shown that the effect manifests itself when the graphene work function is no more than 4.8 eV. This effect, in our opinion, is determined by the following reasons. The absence of a significant outflow of holes into the silicon volume, which contributes to the effective separation of nonequilibrium charges in the depleted silicon region. The absence of the influence of the concentration of equilibrium holes on the charge of the depleted silicon layer, which contributes to the stabilization of the electric field strength in the depleted silicon layer. The established effect can be applied to the creation of highly sensitive photodetectors, as well as for metrological applications.

**Keywords:** heterostructure; graphen; silicon; photodetector; sunlight.

### Введение

Гетероструктуры графен/кремний активно исследуются с целью создания фотодетекторов [1, 2]. Их важным преимуществом является возможность получения

высокой чувствительности за счет электронных свойств графена. Быстрый отклик возможно получить из-за высокой подвижности носителей заряда в графене. Поэтому в фотодетекторах графен ис-

пользуется не только как прозрачный контактный материал, но и как проводящий канал, повышающий чувствительность сенсора [3, 4]. Несмотря на существенный прогресс в достижении экспериментальных результатов по чувствительности и быстродействию фотодетекторов с использованием графена в фотодетекторах остается еще ряд невыясненных вопросов, связанных с пониманием механизмов токопереноса, взаимосвязи электрофизических параметров графена и кремния, а также проявления специфических свойств графена в условиях освещения и генерации носителей заряда в кремнии.

В этом плане вопросы, связанные с электропроводностью графена, находящегося на легированном кремнии, не вполне разработаны. При непосредственном контакте графена с кремнием возникает барьер Шоттки, и изменяются электрофизические параметры графена в зависимости от его работы выхода и типа проводимости кремния. Меняется электрохимический потенциал графена, концентрации электронов и дырок, квантовая емкость, что оказывает существенное влияние на токоперенос в графене.

Для моделирования характеристик фотодетекторов возникает необходимость исследовать влияние свойств кремния, на поверхности которого находится графен, на изменения электрофизических параметров графена в условиях воздействия излучения. В данной работе рассмотрена гетероструктура графен/кремний n-типа при комнатной температуре и солнечном облучении и определены закономерности влияния интенсивности излучения и параметров материалов на напряжение холостого хода, концентрацию электронов в графене и квантовую емкость.

### Модель

Гетероструктура графен/кремний характеризуется наличием барьера Шоттки, возникающего из-за разности работ выхода этих материалов. При облучении возникает разность электрохимических по-

тенциалов для электронов и дырок. Для кремния n-типа в его обедненном слое электрохимический потенциал электронов практически равен его химическому потенциалу в объеме, а для дырок сдвигается на величину разности потенциалов, обусловленной освещением. При отсутствии тока в гетероструктуре его величина соответствует напряжению холостого хода  $V_{oc}$  (open circuit voltage). В отсутствии освещения, обедненный слой кремния имеет положительный заряд, а графен получает избыток электронов для создания электронейтральности гетероструктуры в целом. В этом случае происходит сдвиг электрохимического потенциала графена на величину, соответствующую избытку электронов. Для случая концентрации доноров в кремнии  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , работы выхода графена 4.7-4.9 эВ, избыток электронов в кремнии соответствует сдвигу электрохимического потенциала порядка 0.05 эВ. В условиях облучения возникает разность потенциалов, равная в данном случае напряжению холостого хода  $V_{oc}$ , которое также способствует дальнейшему сдвигу электрохимического потенциала графена. Таким образом, для оценки изменения проводимости графена необходимо найти изменение концентрации электронов в нем при освещении при напряжении  $V_{oc}$ . Для нахождения  $V_{oc}$  рассматривается равенство нулю суммарного тока электронов и дырок в кремнии при освещении [5]. Исходя из этого условия находятся распределения напряженности электрического поля и концентрации неравновесных дырок  $p$  в обедненной области кремния. В данной работе используем разработанную нами модель, учитывающую процессы поверхностной рекомбинации, а также баланс дырок на границе обедненной области кремния и его нейтральной области [5]. Согласно этой модели:

$$V_{oc} = - \int_0^w dz \frac{D'(dp/dz) - \mu' E_0 p}{\mu_n n_0 + \mu_p p_0 + \mu' p} \quad (1)$$

где  $\mu' = \mu_n (\tau_n / \tau_p) + \mu_p$ ,  $w$  – протяжен-

ность обедненного слоя кремния,  $n_0$ ,  $p_0$  – равновесные концентрации электронов и дырок,  $E_0$  – напряженность электрического поля в кремнии, создаваемая равновесным распределением заряда,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок в кремнии,  $D' = D_n(\tau_n/\tau_p) - D_p$ ,  $D_n$ ,  $D_p$  – коэффициенты диффузии электронов и дырок в кремнии,  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  – время жизни электронов и дырок в кремнии,  $z$  – координата, нормальная к границе раздела графен/кремний.

Распределение концентрации неравновесных дырок определяется из условия равенства нулю суммарного тока электронов и дырок в кремнии (см. [5]).

В качестве граничного условия рассматриваем выражение для тока дырок при  $z=0$  и  $z=w$

$$J_p(0) = qS_p p_s = J_{pw} - q \int_0^w G(z) dz \quad (2)$$

где  $p_s$  – концентрация неравновесных дырок на поверхности кремния,  $G = G_0 \exp(-\alpha z)$  – темп генерации неравновесных носителей заряда в кремнии,  $\alpha$  – коэффициент поглощения излучения,  $S_p$  – скорость поверхностной рекомбинации,  $J_{pw}$  – плотность тока дырок на границе нейтрального и обедненного слоев кремния  $J_{pw}$ ,  $q$  – элементарный заряд.

Концентрация электронов  $n_e$ , дырок  $n_h$  и квантовая емкость  $C_Q$  графена определяются в виде [6]

$$n_e(\mu) = \int_0^{+\infty} g_{2D}(\varepsilon) f(\varepsilon - \zeta - U) d\varepsilon \quad (3)$$

$$n_h(\mu) = \int_{-\infty}^0 g_{2D}(\varepsilon) [1 - f(\varepsilon - \zeta - U)] d\varepsilon \quad (4)$$

$$C_Q = q \partial(n_e - n_h) / \partial(\zeta - U) \quad (5)$$

где  $g_{2D}$  – плотность состояний графена,  $\zeta$  – химический потенциал графена в отсутствии освещения,  $U = -q\phi$  – электростатическая энергия, возникающая в графене при освещении за счет генерации неравновесных носителей заряда в кремнии,  $\phi$  – электростатический потенциал,  $f$  – функция Ферми-Дирака.

## Результаты и их обсуждение

Для расчетов использовались следующие

параметры: концентрация доноров  $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , работа выхода графена  $F_G = 4.65 - 4.9 \text{ эВ}$ , электронное сродство для кремния  $\chi = 4.05 \text{ эВ}$ , ширина запрещенной зоны кремния  $\varepsilon_g = 1.12 \text{ эВ}$ , подвижность электронов в кремнии  $800 - 1500 \text{ см}^2/(\text{В с})$  и дырок  $300 - 450 \text{ см}^2/(\text{В с})$ , собственная концентрация носителей  $1.45 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , время жизни электронов  $5 - 10 \text{ мкс}$  и дырок  $1 - 5 \text{ мкс}$ ,  $G_0 = (0.01 - 2) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}/\text{с}$ ,  $\alpha = 10^4 - 10^5 \text{ см}^{-1}$ ,  $g_{2D} = 2\varepsilon / [\pi(\hbar v_0)^2]$ . Здесь  $\hbar$  – постоянная Планка,  $v_0 = 10^6 \text{ м/с}$  – скорость Ферми в графене. Длина волны излучения  $\lambda = 400 - 500 \text{ нм}$ .

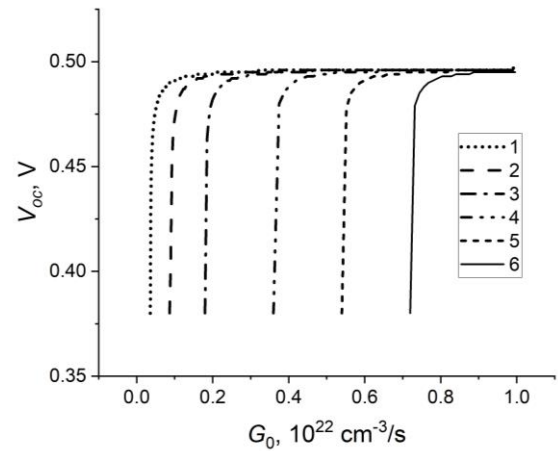


Рис. 1. Зависимость напряжения холостого хода от интенсивности излучения  $G_0$  при различных плотностях тока дырок в объеме кремния: 1  $\text{мА/см}^2$  (1), 2.5  $\text{мА/см}^2$  (2), 5  $\text{мА/см}^2$  (3), 10  $\text{мА/см}^2$  (4), 15  $\text{мА/см}^2$  (5), 20  $\text{мА/см}^2$  (6)

Fig. 1. Open-circuit voltage versus radiation intensity  $G_0$  at different current densities of holes into the silicon bulk: 1  $\text{mA/cm}^2$  (1), 2.5  $\text{mA/cm}^2$  (2), 5  $\text{mA/cm}^2$  (3), 10  $\text{mA/cm}^2$  (4), 15  $\text{mA/cm}^2$  (5), 20  $\text{mA/cm}^2$  (6).

На рис. 1 приведены зависимости напряжения холостого хода  $V_{oc}$  от интенсивности излучения при  $F_G = 4.8 \text{ эВ}$  и изменении тока дырок в объеме кремния в диапазоне  $1 - 20 \text{ мА/см}^2$ . Как можно видеть, наблюдается эффект стабильности напряжения  $V_{oc}$  при уменьшении интенсивности более чем в 10 раз при условии, что величина плотности тока дырок в объеме кремния не превышает  $1 \text{ мА/см}^2$ . С ростом плотности тока дырок в объеме кремния диапазон стабилизации напряжения  $V_{oc}$  уменьшается и при плотности тока дырок  $J_{pw} = 20 \text{ мА/см}^2$  составляет только 25 %

максимальной величины интенсивности излучения.

На рис. 2 приведены зависимости концентрации электронов в графене при тех же значениях тока дырок в объем кремния. Как можно видеть, также наблюдается эффект стабильности  $n_e$  с уменьшением интенсивности излучения.

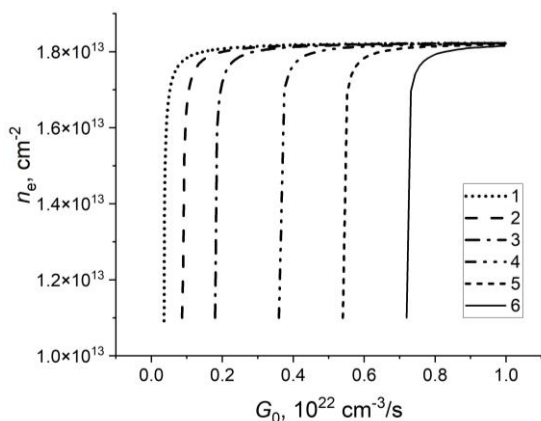


Рис. 2. Зависимость концентрации электронов в графене от интенсивности излучения  $G_0$  при тех же плотностях тока дырок в объем кремния, что и на рис. 1

Fig. 2. Concentration of electrons in graphene versus radiation intensity  $G_0$  at the same current densities of holes into the silicon bulk as in Fig. 1

Аналогичные результаты получены для зависимости квантовой емкости от интенсивности излучения. Ее величина в области стабилизации составляет  $11 \mu\text{Ф}/\text{см}^2$  и характеризуется таким же ступенчатым видом.

Данный эффект на наш взгляд определяется несколькими причинами. Во-первых, отсутствием существенного оттока дырок в объем кремния, что способствует эффективному разделению неравновесных зарядов в обедненной области кремния, во-вторых, близостью концентрации генерированных дырок в обедненном слое (на поверхности кремния) к концентрации ионизированных доноров, что ведет к сохранению положительного заряда обедненного слоя при снижении темпа генерации неравновесных носителей заряда, в-третьих, снижением вклада в заряд обедненного слоя кремния концентрации равновесных дырок. В последнем случае концентрация равновесных дырок

не оказывает влияния на распределение заряда в обедненном слое и не влияет на эффективность разделения неравновесных носителей заряда. Поэтому и величина напряжения  $V_{oc}$  стабилизируется. Последний фактор начинает оказывать влияние при росте работы выхода графена.

Сочетание указанных факторов приводит к тому, что в определенной области интенсивности излучения напряжение холостого хода практически не меняется по причине стабилизации заряда обедненного слоя и несущественного изменения концентрации неравновесных дырок в нем из-за блокирования их оттока в объем кремния. Эти факторы способствуют также стабилизации электрофизических параметров графена, определяющих его проводящие свойства – электрохимическому потенциалу, концентрации носителей заряда, квантовой емкости. На рис. 2 приведены результаты расчета концентрации электронов  $n_e$  для графена, из которых видна стабилизация их значений в диапазонах интенсивностей излучения, определяемых плотностью тока дырок в объем кремния.

Подтверждением приведенного выше объяснения стабилизации электрофизических параметров в гетероструктуре графен/кремний n-типа служат результаты расчета напряжения холостого хода, квантовой емкости и концентрации электронов в графене при  $N_d=10^{16} \text{ см}^{-3}$  и величине работы выхода графена 4.9 эВ. Их них следует, что имеющаяся для рассмотренного выше случая стабилизация параметров  $V_{oc}$ ,  $C_Q$ ,  $n_e$  отсутствует. В этом случае наблюдается изменение величин этих параметров с изменением интенсивности излучения по всему рассматриваемому диапазону изменения интенсивности излучения. Вызвано это влиянием концентрации равновесных дырок в обедненной области на распределение неравновесных дырок, что ведет к снижению эффективности разделения неравновесных зарядов и снижению  $V_{oc}$  с уменьшением интенсивности излучения.

При снижении работы выхода графена до 4.6-4.7 эффект стабилизации электрофизических параметров гетероструктуры графен/кремний сохраняется. Однако при этом снижается напряжение  $V_{oc}$  и, соответственно, значения  $C_Q$ ,  $n_e$ . В этом случае снижается потенциальный барьер на границе графен/кремний и, соответственно, возрастают темновые токи электронов и дырок, что требует дополнительных исследований.

### Заключение

Проведенное моделирование электрофизических параметров гетероструктуры графен/кремний (напряжения холостого хода, квантовой емкости и концентрации электронов в графене) показало, что при определенных условиях генерации носителей заряда и токопереноса возможен эффект стабилизации этих параметров при изменении интенсивности излучения. Этот эффект зависит от работы выхода графена и величины тока дырок из области генерации в объем кремния. Эффект возникает при ограничении тока дырок в объем кремния и величине работы выхода не более 4.8 эВ. Установленный эффект может быть использован для создания высокочувствительных фотодетекторов, а также для метрологических применений.

### Библиографические ссылки

1. Riazimehr S., Bablich A., Schneider D., Kataria S., Passi V., Yim Ch., et al. Spectral sensitivity of graphene/ silicon heterojunction photodetectors. *Solid-State Electronics* 2016; 115(Part B): 207-212.
2. Periyangounder D., Gnanasekar P., Varadhan P., He Jr-H., Kulandaivel J. High performance, self-powered photodetectors based on graphene/silicon Schottky junction diode. *Journal of Materials Chemistry C* 2018; 6(35): 9545-9551.
3. Scagliotti M., Salvato M., De Crescenzi M., Kovalchuk N.G., Komissarov I.V., Prischepa S.L. et al. Femtosecond light pulse response of photodetectors

based on Graphene/n-Si heterojunctions. *Carbon* 2019; 152: 643-651.

4. Scagliotti M., Salvato M., De Crescenzi M., Castrucci P., Kovalchuk N.G., Komissarov I.V., et al. 2D Carbon Material/Silicon Heterojunctions for Fast Response Self-Powered Photodetector. *International Journal of Nanoscience* 2019; 18(3,4): 1940088.
5. Трафименко А.Г., Данилюк А.Л. Электрофизические параметры графена на кремнии при облучении солнечным светом. В кн.: Оджаев В.Б., редактор. Сборник научных трудов IX Международной конференции «Материалы и структуры современной электроники». (14–16 октября 2020 года), г. Минск. Минск: Издательский центр БГУ; 2020. С. 411-416.
6. Zebrev G.I. Graphene Field Effect Transistors: Diffusion-Drift Theory. 23 Chapter in Physics and Applications of Graphene-Theory. Ed. by S. Mikhailov. InTech, 2011. P. 476–498.

### References

1. Riazimehr S., Bablich A., Schneider D., Kataria S., Passi V., Yim Ch., et al. Spectral sensitivity of graphene/ silicon heterojunction photodetectors. *Solid-State Electronics* 2016; 115(Part B): 207-212.
2. Periyangounder D., Gnanasekar P., Varadhan P., He Jr-H., Kulandaivel J. High performance, self-powered photodetectors based on graphene/silicon Schottky junction diode. *Journal of Materials Chemistry C* 2018; 6(35): 9545-9551.
3. Scagliotti M., Salvato M., De Crescenzi M., Kovalchuk N.G., Komissarov I.V., Prischepa S.L. et al. Femtosecond light pulse response of photodetectors based on Graphene/n-Si heterojunctions. *Carbon* 2019; 152: 643-651.
4. Scagliotti M., Salvato M., De Crescenzi M., Castrucci P., Kovalchuk N.G., Komissarov I.V., et al. 2D Carbon Material/Silicon Heterojunctions for Fast Response Self-Powered Photodetector. *International Journal of Nanoscience* 2019; 18(3,4): 1940088.
5. Трафименко А.Г., Данилюк А.Л. Электрофизические параметры графена на кремнии при облучении солнечным светом [Electrophysical parameters of graphene on silicon at solar irradiation]. В кн.: Оджаев В.Б., редактор. Сборник трудов IX Международной конференции «Материалы и структуры современной электроники». (14-16 октября 2020 года), г. Минск. Минск: Издательский центр БГУ; 2020. С. 411-416. (In Russian).
6. Zebrev G.I. Graphene Field Effect Transistors: Diffusion-Drift Theory. 23 Chapter in Physics and Applications of Graphene-Theory. Ed. by S. Mikhailov. InTech, 2011. P. 476–498.