ЗАРЯДОВЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ КРЕМНИЙ/ГРАФЕН В КОНТАКТЕ С ПЛАЗМОЙ СТАЦИОНАРНОГО РАЗРЯДА

А.Г. Трафименко, А.В. Кухарев, О.М. Чернаусик, Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки 6, Минск 220013, Беларусь, evdokimovichi@gmail.com, kukharev.av@gmail.com, o.chernausik@bsuir.by, podryabinkin@bsuir.by, danilyuk@bsuir.by

В докладе представлены результаты моделирования зарядовых свойств гетероструктуры кремний/графен в контакте с частично ионизированной плазмой стационарного разряда. Рассмотрено образование тройного заряженного слоя, определяемого барьером Шоттки кремний/графен и ленгмюровским слоем плазмы при отсутствии тока. Проведены расчеты электрохимического потенциала графена и концентрации электронов в нем, а также квантовой емкости в зависимости от работы выхода графена, концентрации доноров в кремнии, концентрации заряженных частиц в плазме, плавающего потенциала плазмы. Показано, что плазма оказывает влияние на электрохимический потенциал графена при условии, что заряд ленгмюровского слоя порядка заряда приповерхностного слоя кремния. Установлены закономерности роста электрохимического потенциала графена и концентрации электронов в нем с увеличением поверхностного потенциала кремния и заряда ленгмюровского слоя плазмы.

Ключевые слова: кремний; графен; гетероструктура; плазма; плавающий потенциал; барьер Шоттки.

CHARGING PROPERTIES OF SILICON/GRAPHENE HETEROSTRUCTURE IN CONTACT WITH STATIONARY DISCHARGE PLASMA

Anton G. Trafimenko, Andrew V. Kukharev, Olga M. Chernausik, Denis A. Podryabinkin, Alexander L. Danilyuk
Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, 6 P. Browka Str., 220013 Minsk, Belarus, evdokimovichi@gmail.com, kukharev.av@gmail.com, o.chernausik@bsuir.by, podryabinkin@bsuir.by, danilyuk@bsuir.by

The report presents the results of modeling the charge properties of a silicon/graphene heterostructure in contact with partially ionized plasma of a stationary discharge. The formation of a triple charged layer determined by the silicon/graphene Schottky barrier and the Langmuir plasma layer in the absence of current is considered. In this case, the heterostructure will acquire a floating potential relative to the plasma volume, which will arise due to the charge of its surface. The fluxes of charged plasma particles (ions and electrons) to the surface are equalized and a positively charged (Langmuir) layer appears in the surface region of the plasma due to a significant difference in the electron and ion mobilities. The models of charged layers in the absence of current through the heterostructure are presented. The electrochemical potential of graphene and the electron concentration in it, as well as the quantum capacitance depending on the graphene work function, the donor's concentration in silicon, the charged particles concentration in plasma, and the floating potential of plasma, have been calculated. It is shown that the plasma affects the electrochemical potential of graphene under the condition that the charge of the Langmuir layer is of the order of the charge of the near-surface silicon layer. Regularities have been established for the growth of the electrochemical potential of graphene and the concentration of electrons in it with an increase in the surface potential of silicon and the charge of the Langmuir plasma layer. It is shown that with an increase in the surface potential of silicon, the electrochemical potential of graphene increases. The range of its change with the plasma charge is (0.2-4.15)kT when the charge of the Langmuir layer is varied in the range from 1.5 10^{-4} to 1.5 10^{-3} C/m^2. As the charge of the Langmuir layer increases, the relative change in the electrochemical potential of graphene decreases, which is associated with an increase in the plasma contribution to the charge of graphene. A similar picture is observed for the electron concentration.

Keywords: silicon; graphene; heterostructure; plasma; floating potential; Schottky barrier.

Введение

Процессы взаимодействия плазмы с поверхностью полупроводников актуальны в настоящее время в связи с разработкой и

совершенствованием технологий микроэлектроники, плазменного травления и окисления, очистки и т.п. Такие процессы характеризуются наличием заряженных слоев на границе раздела плазма/полупроводник или диэлектрик, которые, очевидно, оказывают определенное влияние на эти процессы. Поэтому исследования свойств заряженных слоев, возникающих при контакте полупроводниковых материалов с плазмой, необходимы для лучшего понимания механизмов, указанных выше процессов и совершенствования плазменных технологий в микроэлектронике. Целью работы является моделирование свойств заряженных слоев гетероструктуры кремний/графен в контакте с частично ионизированной плазмой стационарного разряда в зависимости от электрофизических параметров плазмы, кремния и графена.

Модели заряженных слоев

В отсутствии тока на контакте плазма твердое тело устанавливается стационарное состояние, при котором твердое тело находится под плавающем потенциалом φ_f относительно объема плазмы, величина которого определяется из равенства потоков электронов и ионов из плазмы на поверхность. Величина плавающего потенциала φ_f определяется как [1]

$$e\varphi_f = kT_e \ln\left[0.654(1-r_e)\sqrt{m_i/m_e}\right], \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, k – постоянная Больцмана, T_e – температура электронов плазмы, r_e – кинетический коэффициент отражения электронов, m_i, m_e – масса ионов и электронов плазмы. Распределение потенциала $\varphi_p(x)$ в ленгмюровском слое плазмы определяется с учетом резонансной перезарядки ионов на атомах [1]:

$$\left(\frac{r_p}{l_i}\right)^2 \frac{d^2\Phi}{dy^2} = \gamma_0 \int_0^\infty \frac{\exp[-(y'-y)]dy'}{\sqrt{\Phi(y)-\Phi(y')}} - e^{-\Phi}, \quad (2)$$

где $y=x/l_i$, $\Phi=e\varphi_p(x)/kT_e$, $r_p=(\varepsilon_0 kT_e/2e^2 n_{p0})^{1/2}$ – дебаевский радиус экранирования в плазме, γ_0 – параметр, зависящий от выбора начала отсчета потенциала в плазме, l_i – длина свободного пробега ионов относительно резонансной перезарядки на атомах, ε_0 – электрическая постоянная, n_{p0} – концентрация заряженных частиц в объеме плазмы. Решение уравнения (2) численно определяет заряд ленгмюровского слоя плазмы Q_L в зависимости от плавающего потенциала φ_f и концентрации заряженных частиц в ней.

Заряд в приповерхностной области (ОПЗ) кремния Q_{sc}, индуцируемый барьером Шоттки, определяем с помощью известной модели изгиба зон в ОПЗ [2]

$$Q_{sc} = [\sqrt{2}\varepsilon_s\varepsilon_0 kT/eL_D]F(\varphi_s, n_0, p_0), \quad (3)$$

где ε_s, L_D – относительная диэлектрическая проницаемость и дебаевская длина экранирования в кремнии, $\varphi_s=F_G-\chi-(E_c-E_F)/e$ – электростатический потенциал поверхности кремния относительно его объема, F_G – работа выхода графена, χ – энергия электронного сродства кремния, E_c-E_F – положение энергии Ферми E_F кремния относительно дна его зоны проводимости. F – функция φ_s и концентрации равновесных электронов n_0 и дырок p_0 в кремнии [2]. Заряд в графене Q_G определяется разностью концентраций электронов n_e и дырок n_h, $Q_G=en_s=e(n_e-n_h)$, где [3]

$$n_S = \int_0^\infty d\varepsilon g(\varepsilon)[f(\varepsilon-\mu) - f(\varepsilon+\mu)], \quad (4)$$

здесь $g(\varepsilon)=2\varepsilon/(\pi\hbar^2 v_F^2)$ – плотность состояний в графене с бесщелевым энергетическим спектром, ε – энергия электронов, $\hbar$ - постоянная Планка, v_F – скорость Ферми графена, f – функция Ферми-Дирака, $\mu=\zeta+e\varphi_s$ электрохимический потенциал графена, ζ – химический потенциал свободного графена. Условие квазинейтральности гетероструктуры в контакте с плазмой:

$$Q_{sc}+Q_L-en_s=0, \quad (5)$$

Из уравнения (5) определяем электрохимический потенциал графена, концентрацию электронов, квантовую емкость в зависимости от работы выхода графена, концентрации доноров в кремнии, величины плавающего потенциала плазмы и концен-

трации заряженных частиц в ней. Результаты расчета μ и n_e приведены на рис. 1. Для расчета использовались следующие параметры плазмы и кремния: N_D=10^{14}-10^{15} см$^{-3}$, F_G=4.4-4.6 эВ, χ=4.05 эВ, n_{p0}=10^8-10^{12} см$^{-3}$, $e\varphi_f/kT_e$=4.0-5.0, T_e =5 10^3-3 10^4 К, $(r_p/l_i)^2$ = 10^{-4}-10^{-1}, m_i=1.46 10^{-25} кГ. Напряженность поля на поверхности графена, создаваемая плазмой варьировалась в пределах 10^2-5 10^4 В/см.

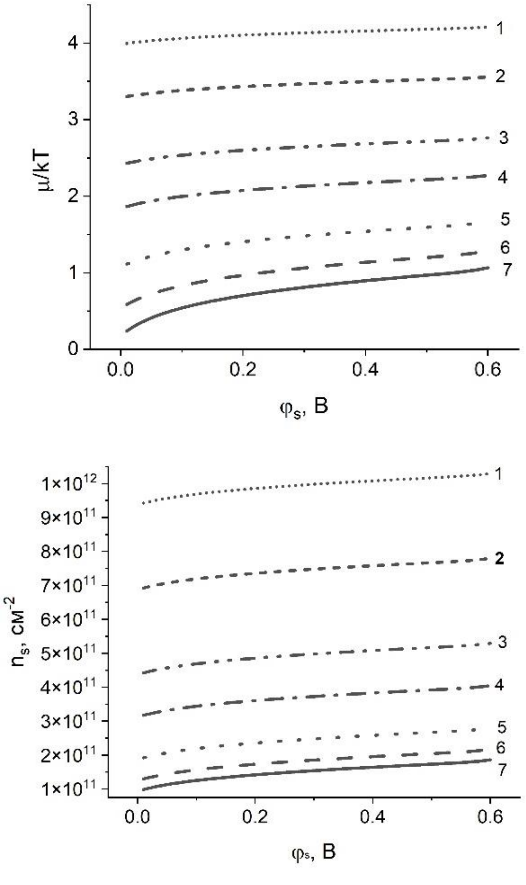

Рис. 1. Электрохимический потенциал графена (а) и концентрация электронов в графене (б) в зависимости от поверхностного потенциала кремния при различных значениях заряда ленгмюровского слоя плазмы Q_L (10^{-4} Кл/м^2): 15.0 (кривая 1), 11.0 (2), 7.0 (3), 5.0 (4), 3.0 (5), 2.0 (6), 1.5 (7)

Установлено, что величина заряда ленгмюровского слоя оказывает существенное влияние на концентрацию электронов в графене только при условии, что его заряд сопоставим с зарядом ОПЗ кремния. С ростом поверхностного потенциала кремния электрохимический потенциал графена увеличивается. Диапазон его изменения с изменением заряда плазмы составляет (0.2-4.15)kT при варьировании заряда Q_L в области от 1.5 10^{-4} до 1.5 10^{-3} Кл/м^2. С ростом Q_L относительное изменение μ уменьшается, что связано с усилением вклада плазмы в заряд графена. Аналогичная картина наблюдается для концентрации электронов. Для рассматриваемого случая наиболее существенный вклад заряд ленгмюровского слоя в электрофизические свойства графена оказывает при концентрации заряженных частиц плазмы в области 10^{11}-10^{12} см$^{-3}$ и температуре электронов выше 10^4 К.

Заключение

В докладе представлены результаты моделирования зарядовых свойств гетероструктуры кремний n-типа/графен в контакте с плазмой стационарного разряда. Установлены закономерности влияния параметров кремния, работы выхода графена, параметров плазмы на изменение электрохимического потенциала и концентрации электронов в графене. Показано, что плазма оказывает существенное влияние на зарядовые свойства графена только при условии, что заряд ленгмюровского слоя плазмы сопоставим с приповерхностным зарядом кремния. В этом случае концентрация электронов в графене может возрастать до 10^{12} см$^{-3}$.

Библиографические ссылки

1. Бакшт Ф.Г., Юрьев В.Г. Приэлектродные явления в низкотемпературной плазме. *Журнал технической физики* 1979; 49(5): 905-944.
2. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х кн. Кн. 1 / под ред. С. Зи. Москва: Мир; 1984. 456 с.
3. 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: 476-498.