

ЗАРЯДОВЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ГРАФЕН/ ДИЭЛЕКТРИК/ КРЕМНИЙ

Мельникова В.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Данилюк А.Л. – канд. физ.-мат. наук, доцент

В данной работе исследованы зарядовые свойства гетероструктуры графен/диэлектрик/кремний. Рассмотрена самосогласованная взаимосвязь между химическим потенциалом и концентрацией носителей заряда в зависимости от потенциала полевого электрода, емкости диэлектрика и емкости поверхностных состояний. Показано, что при существенной величине емкости поверхностных состояний зарядовые свойства графенового канала претерпевают скачкообразный переход из одного устойчивого состояния в другое.

Графен рассматривается как перспективный материал для полевых транзисторов, несмотря на отсутствие запрещенной зоны, не позволяющей напрямую применять его в цифровой электронике [1]. Однако его преимущества, такие как высокая подвижность и чувствительность к эффекту поля привлекает внимание исследователей для его использования в качестве элемента аналоговой электроники, где невозможность блокирования тока не является принципиальным ограничивающим фактором. В связи с развитием графеновой электроники встает задача проектирования

высокоскоростных графеновых транзисторов. Характеристики таких транзисторов помимо свойств самого графена существенно определяются параметрами диэлектрика, подложки, а также межфазных границ. Это требует помимо развития технологии получения самого графена и создания графеновых транзисторных структур также разработки моделей функционирования полевых графеновых транзисторов, интегрированных в существующие системы автоматизированного проектирования.

Существенное влияние на электрические характеристики транзистора с графеновым каналом оказывают толщины и материалы диэлектрических слоев, свойства подложки и интерфейсов (плотности поверхностных состояний на границе раздела двумерного канала с подзатворным диэлектриком, ПС). Эти факторы определяют такие важные электрофизические параметры как химический потенциал носителей заряда μ и его зависимость от потенциала полевого электрода V_G , концентрация носителей заряда (электронов n_e и дырок n_h), величина заряда канала, квантовая емкость C_Q , емкость канала C_{CH} и емкость исток-затвор C_G . Эти параметры обуславливают передаточные и выходные электрические характеристики транзистора, его крутизну и коэффициент усиления по напряжению. Поэтому наряду с совершенствованием технологии получения транзисторов с графеновыми каналами также актуальным является исследование режимов их функционирования, особенно с точки зрения влияния на них электрофизических параметров самой структуры и контактных явлений. Таким образом, значимой и актуальной является задача развития моделей высокоскоростных графеновых полевых транзисторных структур, учитывающих специфические физические особенности двумерных кристаллов, межфазные области и контактные явления.

Связь между концентрацией носителей заряда в канале и химическим потенциалом μ самосогласованно определяется уравнением электростатики [2]

$$qV_G = \mu \left(1 + \frac{C_{it}}{C_{ox}} \right) + \frac{q^2 n_S(\mu)}{C_{ox}}, \quad (1)$$

где V_G – потенциал полевого электрода, $n_S = n_e - n_h$, C_{ox} – удельная емкость подзатворного диэлектрика, q – элементарный заряд, C_{it} – удельная емкость ПС, n_e , n_h – концентрация электронов и дырок в графеновом канале, определяемая статистикой Ферми-Дирака, исходя из плотности состояний двумерного канала:

$$n_e(\mu) = \frac{2(kT)^2}{\pi(\hbar v_F)^2} \int_0^\infty \frac{u du}{1 + \exp[u - (\mu/kT)]}, \quad (2)$$

$$n_h(\mu) = n_e(-\mu), \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура, v_F – скорость Ферми графена, \hbar – нормированная постоянная Планка, $u = \varepsilon/kT$, ε – энергия носителя заряда.

Система уравнений (1)-(3) самосогласованным образом определяет зависимости концентрации носителей заряда и химического потенциала от напряжения полевого электрода V_G , а также емкости диэлектрика и емкости ПС. В конечном итоге она определяет самосогласованную связь всех электрофизических параметров транзисторной структуры с графеновым каналом. Поэтому необходимо рассмотреть соотношения между параметрами V_G , n_S , μ , C_{ox} , C_{it} более подробно. Для проведения расчетов использовались следующие значения $T = 300$ К, $v_F = 10^6$ м/с, $C_{ox} = (5-10) \cdot 10^{-3}$ Ф/м², $C_{it} = (5-85) \cdot 10^{-3}$ Ф/м², $\kappa = 16$, $d = 15$ нм. Здесь κ – относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика, d – его толщина.

На рис.1 приведены полученные зависимости химического потенциала и концентрации n_S от напряжения полевого электрода при различных значениях емкости ПС. Как можно видеть, при относительно низкой емкости ПС зависимости $\mu(V_G)$ и $n_S(V_G)$ носят монотонный характер, а при увеличении C_{it} до $(81-83) \cdot 10^{-3}$ Ф/м² появляется скачкообразное изменение $\mu(V_G)$ и $n_S(V_G)$. Это связано с существенным увеличением соотношения емкостей C_{it}/C_{ox} , которое ведет к расходимости решения системы (1)-(3) в определенной критической точке, определяемой значением напряжения V_G . Физически это отражает тот факт, что высокая емкость ПС ведет к возникновению неустойчивости зарядового состояния в графеновом канале из-за невозможности постепенной (линейной) компенсации емкости ПС квантовой емкостью канала C_Q .

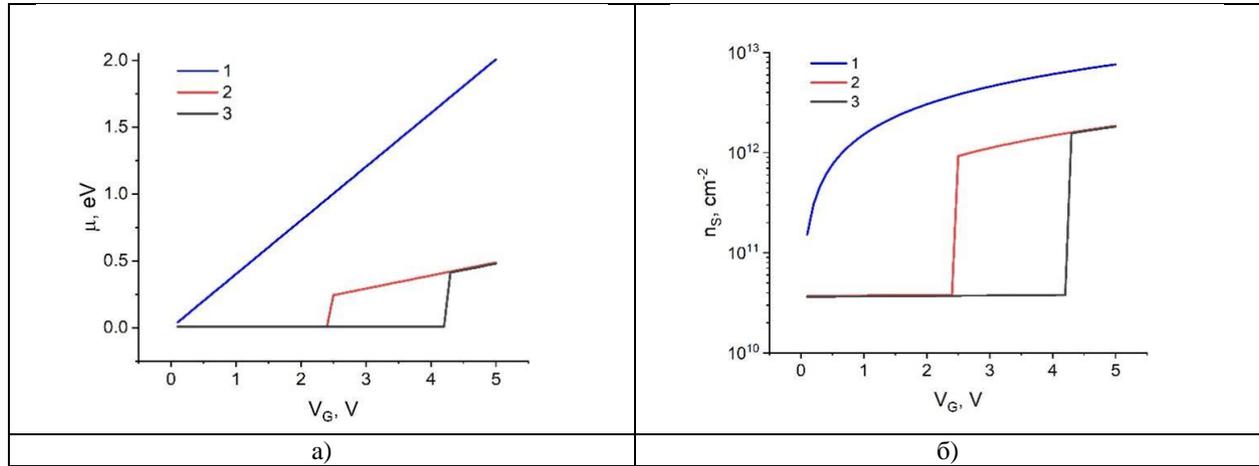


Рисунок 1 - Химический потенциал (а) и концентрация носителей заряда (б) в графеновом канале в зависимости от потенциала полевого электрода V_G : $C_{ox} = 9.44 \cdot 10^{-3}$ Ф/м², $C_{it} = 8 \cdot 10^{-3}$ Ф/м² (кривые 1), $C_{it} = 81 \cdot 10^{-3}$ Ф/м² (кривые 2), $C_{it} = 83 \cdot 10^{-3}$ Ф/м² (кривые 3).

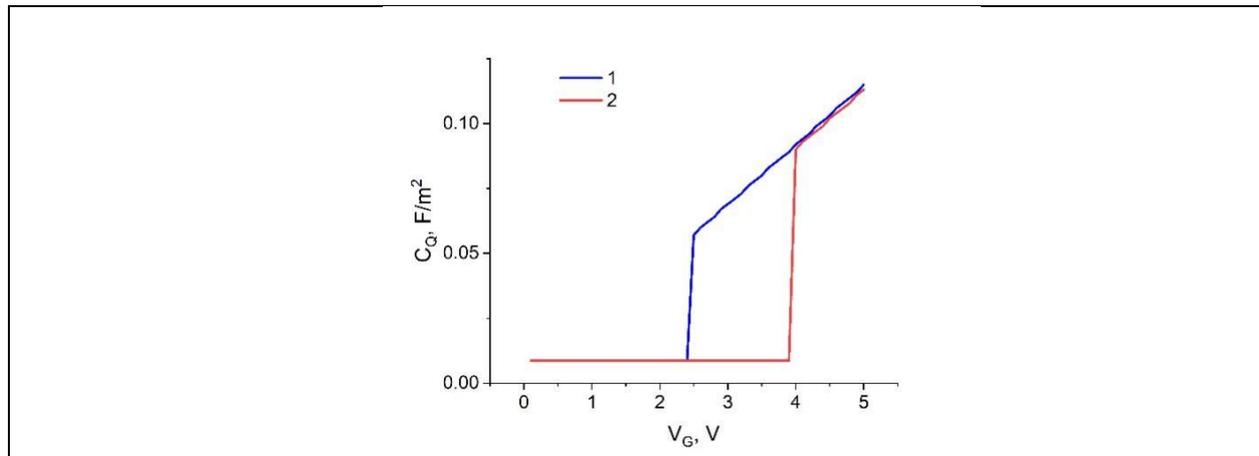


Рисунок 2 - Квантовая емкость графенового канала в зависимости от потенциала полевого электрода V_G : $C_{ox} = 9.44 \cdot 10^{-3}$ Ф/м², $C_{it} = 81 \cdot 10^{-3}$ Ф/м² (кривая 1), $C_{it} = 82.5 \cdot 10^{-3}$ Ф/м² (кривая 2).

На рис.2 показана зависимость квантовой емкости графенового канала C_Q от потенциала V_G . Как можно видеть, компенсация емкости ПС и рост C_Q наступает только после преодоления неустойчивости, или переходу из одного устойчивого состояния в другое.

Список использованных источников:

1. F. Schwierz. Graphene transistors. Nature Nanotech. – 2010. - Vol.5. - P.487-496.
2. G.I. Zebrev. 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.