

УДК 621.315.592.01

ФЛЭШ ПАМЯТЬ ОСНОВАННАЯ НА МУЛЬТИГРАФЕНЕ

© 2016 г. Ю. Н. Новиков*, В. А. Гриценко*, **, Г. Я. Красников***, О. М. Орлов***

*Институт физики полупроводников СО Российской АН

**Новосибирский Государственный Университет, 630090

***Акционерное общество “Научно-исследовательский институт молекулярной электроники” (АО “НИИМЭ”)

E-mail: nov@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 06.05.2015 г.

Численно рассчитывались характеристики записи/стирания и хранения заряда в элементе памяти основанного на структуре Si/HfO₂/мультиграфен/SO₂/Si. Благодаря достаточно большой работе выхода для электронов в мультиграфене появляется возможность увеличить время хранения инжектированного в него заряда. Использование мультиграфена во ФЛЭШ элементах памяти дает возможность увеличить быстродействие и/или понизить напряжение перепрограммирования этих устройств.

DOI: 10.7868/S0544126915060058

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время графен и мультиграфен (несколько слоев графена) широко исследуется для использования в микроэлектронике, в том числе, при разработке ФЛЭШ памяти [1].

Недостатком ФЛЭШ памяти основанной на хранении заряда в кремниевых кластерах [2] является маленький энергетический потенциальный барьер (3.15 эВ) для электронов на границе Si/SiO₂. Поэтому для предотвращения стекания заряда в режиме хранения в подложку из кремниевого кластера необходимо использовать толстый (~5.0 нм) туннельный слой SiO₂ [2]. Последний факт приводит к тому что, в элементах памяти основанных на инжекции заряда в кремниевый кластер по механизму Фаулера–Нордгейма не удается накапливать в нем положительный заряд, по причине большого дырочного барьера (3.8 эВ) на границе Si/SiO₂ [2]. Как следствие, использование толстого туннельного слоя SiO₂ памяти приводит: 1) к небольшому окну памяти ~3 В [2] (разница пороговых напряжений элемента памяти в состояниях логической “0” и “1”) в режиме записи/стирания 2) к малым токам инжекции заряда в кремниевый кластер в режиме записи/стирания и, следовательно, к малому быстродействию. В тоже время графен(мультиграфен) имеет достаточно большую работу выхода для электронов 4.8–5.1эВ [3, 4], и соответственно большую величину потенциального барьера ~4 эВ для электронов на границе мультиграфен(графен)/ SiO₂. Это позволяет надеяться, что элемент памяти на основе хранения заряда в мультиграфене будет иметь большее время хранения заряда при повышенных

температурах, то есть более высокую надежность. Эффект интерференции между ближайшими элементами во ФЛЭШ элементах памяти основанной на мультиграфене будет меньше по сравнению с аналогичным эффектом во ФЛЭШ элементах памяти основанных на плавающем кремниевом затворе, так как толщина мультиграфена намного меньше толщины кремневого кластера.

Цель данной работы – моделирование характеристик записи/стирания и хранения заряда ФЛЭШ элемента памяти на основе мультиграфена используемого в качестве запирающей среды. В качестве туннельного диэлектрика рассмотрен SiO₂ а в качестве блокирующего диэлектрика – оксид гафния (HfO₂) с диэлектрической проницаемостью 25. Структура рассматриваемого элемента памяти (рис. 1) включает в себя кремний/оксид гафния/мультиграфен/оксид кремния/полупроводник (КОМОП). Результаты расчеты будут сравниваться с результатами расчета кремний/оксид/кремниевая точка/оксид/полупроводник (КОТОП) структуры из работы [2]. Отметим, что в качестве блокирующего диэлектрика в работе [2] использовался ZrO₂, который имеет идентичную энергетическую диаграмму и диэлектрическую проницаемость как у HfO₂.

2. МОДЕЛЬ

На рис. 2 показана энергетическая диаграмма КОМОП структуры: (а) без приложенного напряжения, (б) при положительном потенциале на затворе (в) при отрицательном потенциале на затворе. Концентрация акцепторов в кремниевой подложке составляет 2×10^{-3} см⁻³. Толщина мультиграфена и

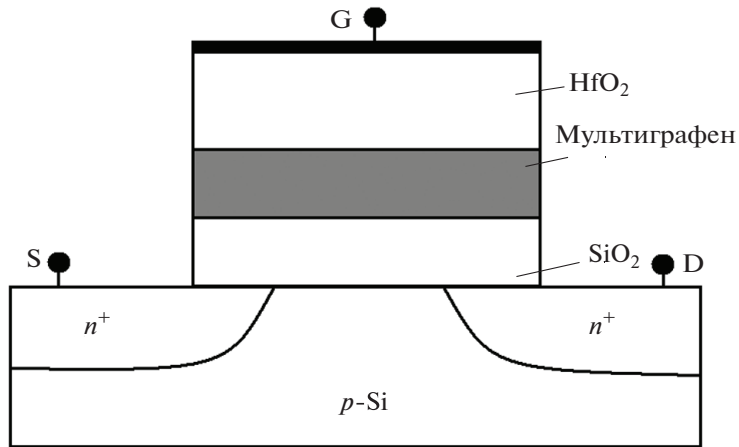


Рис. 1. Элементы памяти КОМОП, основанные на локализации электронов в мультиграфене. Туннельный слой выполнен из SiO₂, блокирующий слой выполненными из HfO₂.

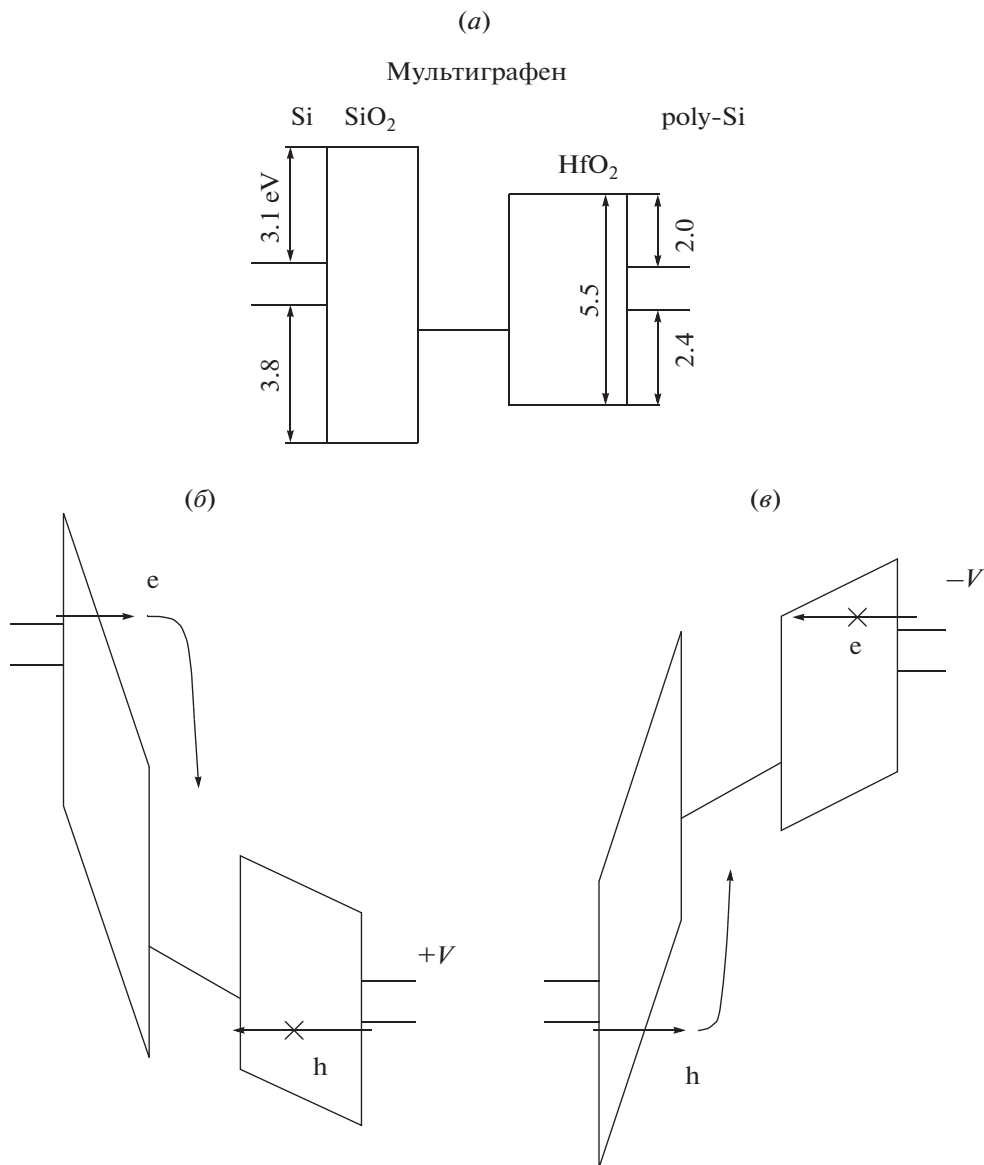


Рис. 2. Энергетические диаграмма КОМОП-структуры: (а) – без приложенного напряжения, (б) – при положительном потенциале на затворе, (в) – при отрицательном потенциале на затворе.

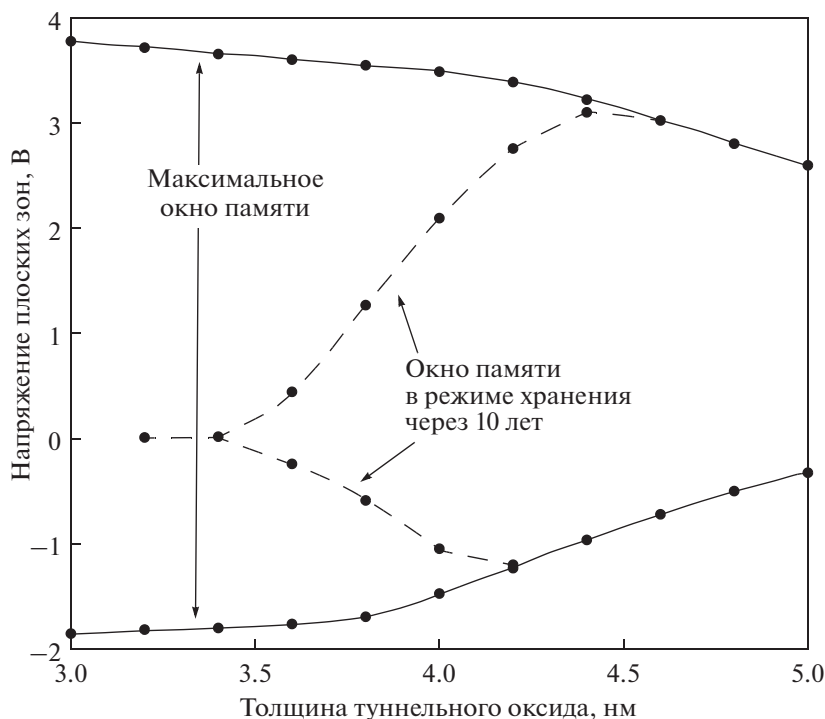


Рис. 3. Зависимость окна памяти в режимах записи/стирания КОМОП-структуры от толщины туннельного слоя из SiO_2 . Толщина туннельного слоя из SiO_2 изменялась в диапазоне от 3.0 до 5.0 нм. В качестве блокирующего диэлектрика использовался HfO_2 толщиной 8.0 нм. Напряжение импульса записи/стирания ± 11 В, длительность 10 мс. Также на рисунке показано окно памяти в режиме хранения (закороченное состояние, через 10 лет).

блокирующего оксида гафния фиксированы и составляют 5.0 нм и 8.0 нм соответственно. Предполагается, что в оксиде гафния нет ловушек, которые могут обеспечить накопление и перенос заряда. Квантованием электронного и дырочного спектра, а так же, эффектами кулоновского отталкивания в мультиграфене пренебрегается. В настоящей работе, так же как и в [2], использовалась одномерная, двухзонная модель, учитывающая инжекцию электронов из отрицательно смещенного и инжекцию дырок из положительно смещенного электрода (рис. 2). Для расчета туннельного тока используется модифицированная формула Фаулера–Нордгейма:

$$j = AF^2P. \quad (1)$$

Здесь $A = 2.2 \times 10^{-6}$ А/В², F — электрическое поле в диэлектрике, P — вероятность туннелирования через слой диэлектрика.

Для электрических полей и толщины диэлектрика d , таких что $Fd > \Phi$, где Φ величина энергетического барьера на границе Si(мультиграфен)/диэлектрик, туннелирование осуществляется через трапециидальный барьер, в этом случае

$$P = \exp\left\{-\frac{4\sqrt{2m^*}\Phi^{3/2}}{3\hbar e F}\right\}. \quad (2)$$

Здесь e — заряд электрона, \hbar — постоянная Планка. Величины туннельной эффективной массы m^* для электронов и дырок в SiO_2 и HfO_2 принимались равными $0.5 m_e$ [2].

В случае трапециидального барьера ($Fd < \Phi$) для расчета туннельного тока использовалась формула

$$P = \exp\left\{-\frac{4\sqrt{2m^*}(\Phi^{3/2} - (\Phi - Fd)^{3/2})}{3\hbar e F}\right\}. \quad (3)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧТА И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 показан расчет окна памяти (сплошная линия) в режиме записи/стирания в зависимости от

толщины туннельного Si_2 в КОМОП-структуре. Толщина туннельного слоя SiO_2 изменялась от 3.0 до 5.0 нм. Для импульсов напряжение записи/сти-

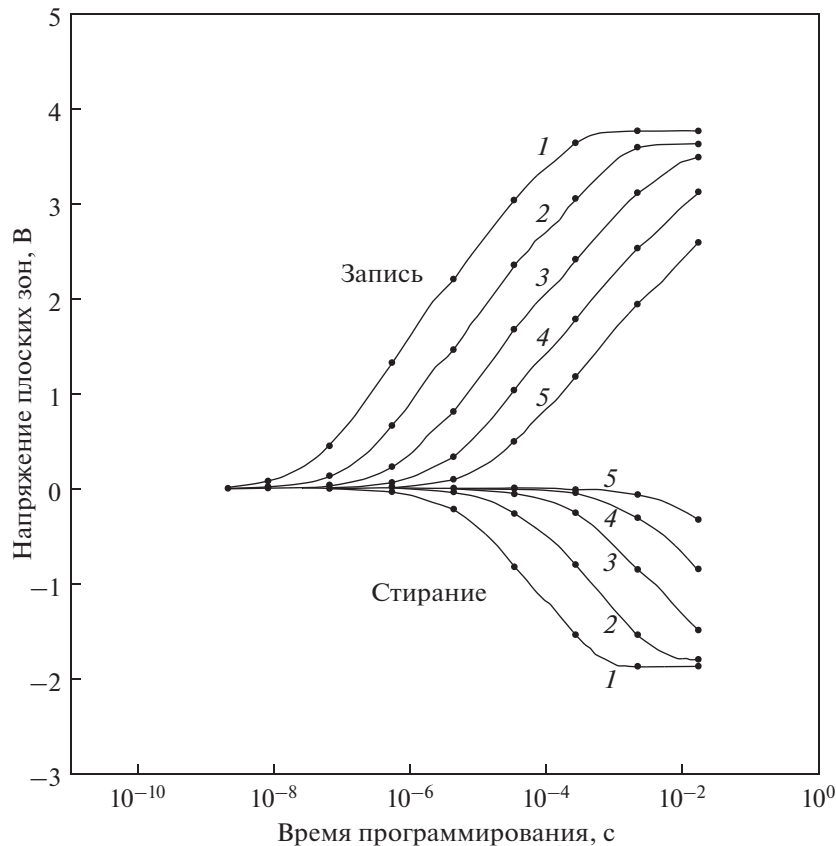


Рис. 4. Зависимость напряжения плоских зон от времени программирования для разных толщин (1 + 5) туннельного слоя SiO_2 изменяющегося в диапазоне от 3.0 до 5.0 нм (с шагом 0.5 нм) в структуре КОМОП. Изменение толщины составляло 0.5 нм. Напряжение импульса записи/стирания ± 11 В, длительность 10 мс. Рисунок характеризует быстродействие КОМОП элемента памяти в зависимости от толщины туннельного слоя (SiO_2).

рания во всей работе, как в работе [2], использовались величины ± 11 В и длительностью 10 мс. На рисунке так же показано пунктирной линией окно памяти в режиме хранения, т.е. окно памяти через 10 лет в закороченном состоянии. Из рисунка 3 видно, что для малых толщин туннельного SiO_2 (~3.0 нм) величина окна памяти в режиме записи/стирания имеет максимальное значение и составляет ~6 В. С увеличением толщины туннельного SiO_2 окно памяти уменьшается, так как уменьшается падение напряжения на туннельном оксиде. Последний факт приводит к уменьшению инжекционных токов из Si-подложки в мультиграфен в режимах записи/стирания. Окно памяти в режиме хранения для малых толщин (~3.0 нм) туннельного SiO_2 , наоборот, имеет нулевое значение, по причине больших токов утечки через туннельно тонкий SiO_2 . С увеличением толщины туннельного SiO_2 время хранения инжектированного заряда в мультиграфен увеличивается. В режиме хранения для толщины туннельного SiO_2 равного ~4.2 нм наблюдается максимальное значение окна памяти, которое составляет ~4 В (рис. 3).

Дальнейшее увеличение толщины туннельного SiO_2 приводит к уменьшению окна памяти в режиме хранения. Уменьшение окна памяти в режиме “хранения” с увеличением толщины туннельного SiO_2 связана с уменьшением величины инжектируемого в мультиграфен заряда в режиме записи/стирания, т.к. уменьшается падение напряжения и, следовательно, инжекционный ток через туннельный оксид.

На рис. 4 показаны характеристики записи/стирания в зависимости от толщины туннельного SiO_2 в диапазоне от 3.0 до 5.0 нм. Изменение толщины туннельного SiO_2 составляет 0.5 нм. Рис. 4 характеризует быстродействие элемента памяти основанного на КОМОП структуре. Из рисунка видно, что быстродействие структуры КОМОП увеличивается с уменьшением толщины туннельного слоя SiO_2 по причине увеличения электрического поля в блокирующем SiO_2 и увеличения тока записи/стирания (рис. 4). Максимальное быстродействие в КОМОП структуре достигается при толщине туннельного SiO_2 равного 0.3 нм. С увеличением толщины туннель-

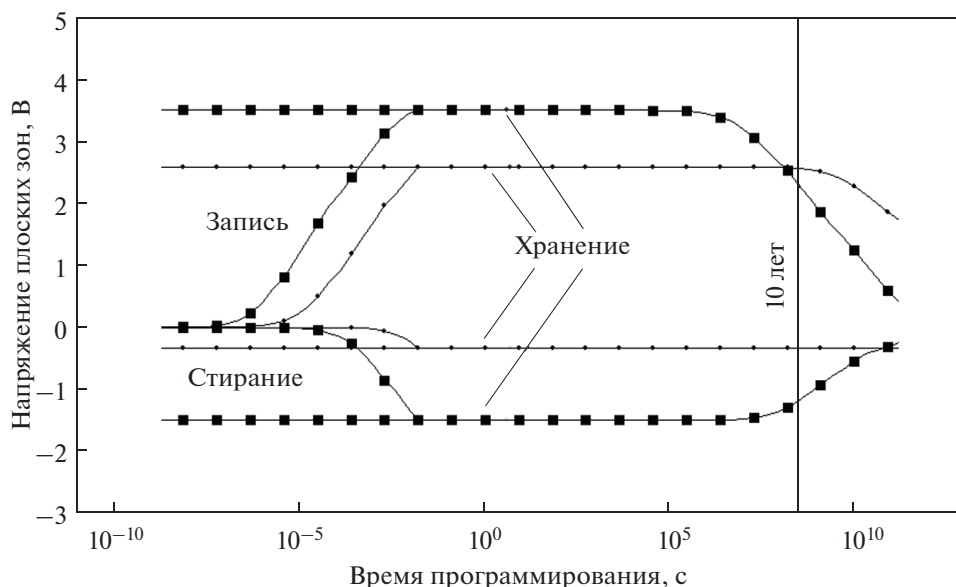


Рис. 5. Сравнение характеристик записи/стирания и хранения КОТОП (точки) и КОМОП (квадраты) структур. Геометрия КОТОП структуры [2]: толщина туннельного SiO_2 5.0 нм, толщина Si-кластера 5 нм, блокирующего HfO_2 8.0 нм. Геометрия КОМОП-структуры: толщина туннельного SiO_2 4.0 нм, толщина мультиграфена 5.0 нм, блокирующего 8.0 нм. Напряжение импульса записи/стирания ± 11 В, длительность 10 мс.

ного SiO_2 наблюдается уменьшение окна памяти и снижение быстродействия элемента памяти. Сравнивая рис. 3 и рис. 4 можно сделать вывод, что существует оптимальная толщина туннельного SiO_2 в КОМОП структуре, которая удовлетворяет трем факторам: максимальное окно памяти в режиме записи/стирания, максимальное быстродействие в режиме записи/стирания и максимальное окно памяти (через 10 лет) в режиме хранения. Расчеты показывают (рис. 3, 4), что этим критериям наиболее подходит толщина туннельного SiO_2 равная ≈ 4.0 нм.

На рис. 5 приведено сравнение характеристик записи/стирания и хранения для КОТОП (точки) [2] и КОМОП (квадраты) структур. Для КОТОП-структуры взята оптимальная геометрия полученная в работе [2]: толщина туннельного SiO_2 5.0 нм, блокирующего слоя из HfO_2 8.0 нм. Для КОМОП-структуры использовалась следующая геометрия: толщина туннельного SiO_2 4.0 нм, толщина мультиграфена 5 нм, толщина блокирующего оксида 8.0 нм. Из рис. 6 видны явные преимущества в характеристиках записи/стирания (хранение) при использовании мультиграфена в структуре КОМОП по сравнению с аналогичными характеристиками в КОТОП-структуре. А именно: окно памяти в режимах записи/стирания (хранения) в КОМОП-структуре превышает более чем в 1.5 раза аналогичные характеристики в КОТОП-структуре. Быстродействие в режиме записи/стирания в КОМОП-структуре превышает на 2–3 порядка быстродействие в КОТОП-струк-

туре. Полученные преимущества стали возможными благодаря следующим эффектам: усиление инжекционного тока через туннельный SiO_2 в КОМОП-структуре достигается за счет уменьшения его толщины. Уменьшение толщины туннельного SiO_2 становится возможным благодаря применению мультиграфена с большой работой выхода для электронов и применению блокирующего диэлектрика (HfO_2) с большой величиной диэлектрической проницаемости. Большая работа выхода для электронов в мультиграфене приводит к большому значению энергетического барьера на границе SiO_2 /мультиграфен и HfO_2 /мультиграфен, что в свою очередь, приводит к малым токам утечки заряда из мультиграфена в Si-подложку в режиме хранения информации.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численного моделирования, на примере использования мультиграфена и применения альтернативного диэлектрика (HfO_2) в качестве блокирующего слоя в структуре КОМОП, показан ряд преимуществ по сравнению с КОТОП-структурами [2]. А именно:

- 1) появляется возможность использовать более тонкий слой туннельного SiO_2 , что позволяет улучшить его инжекционные свойства. Благодаря этому удается значительно увеличить (более чем в 1.5 раза) окно памяти в режимах записи/стирания (± 11 В), которое составляет ~ 5 В. В то же время, так же как и в КОТОП-структуре [2] – паразитная

инжекция, через блокирующий слой HfO_2 в режимах записи/стирания, ослаблена;

2) в режиме хранения достаточно толстый блокирующий слой и большая величина энергетического барьера на границе SiO/мультиграфен препятствуют отеканию накопленного заряда из мультиграфена;

3) появляется возможность использовать более низкие напряжения записи/стирания;

4) на 2–3 порядка повышается быстродействие в режиме записи/стирания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-000192).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hong A.J., Song K.B., Yu H.S., Allen M.J., Kim J., Fowler J.D., Wassei J.K., Park Y., Wang Y., Zou J., Kaner R.B., Weiller B.H., Wang K.L.* Graphene Flash Memory // *AcsNANO*. 2011. V. 5. P. 7812–7817.
2. *Гриценко В.А., Насыров К.А., Гриценко Д.В., Новиков Ю.Н., Асеев А.Л., Лу Д.Х., Ли Д.-В., Ким Ч.В.* Новый элемент памяти на кремниевых нанокластерах в диэлектрике с высокой диэлектрической проницаемостью ZrO_2 для электрически перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства // *ФТП*. 2005. Т. 39. С. 748–753.
3. *Song S.M., Park J.K., Sul O.J., Cho B.J.* Determination of Work Function of Graphene under a Metal Electrode and Its Role in Contact Resistance // *Nano Lett.* 2012. V. 12. P. 3887–3892.
4. Сайт: <http://infotables.ru/fizika/132-rabota-vykhoda-elektronov-iz-inetallov-tablitsa>