

## СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ И МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

PACS numbers: 64.75.St, 65.40.gh, 68.47.De, 68.49.Jk, 68.65.Pq, 73.30.+y, 81.05.ue

### Отражение медленных электронов от графена на грани (110)W

М. М. Нищенко, С. В. Смольник, Н. А. Шевченко

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36,  
03680, ГСП, Киев, Украина*

Методами спектроскопии полного тока и контактной разницы потенциалов в варианте Андерсона изучалось влияние ступенчатого нагрева в диапазоне 1300–2800 К в вакууме до  $5 \cdot 10^{-10}$  Па на работу выхода  $\phi$  и отражение медленных электронов ( $E = 0-50$  эВ) от грани (110)W. Установлено, что при 2400 К на ней формируется монослой углерода (графен) с  $\phi = 5,08 \pm 0,02$  эВ в результате сегрегации его из объема. Повышение температуры до 2800 К и обработка в кислороде удаляют углерод, и образуется атомарно-чистая грань (110)W с  $\phi = 5,30$  эВ. Наблюдаются пики коэффициента отражения электронов от этих поверхностей. Установлено, что их энергетическое положение ( $E$ ) пропорционально квадрату порядкового номера ( $n$ ) пика, что объясняется квантово-размерными эффектами при надбарьерном отражении электронов. Для грани (110)W наблюдается 3 пика, интенсивности которых с ростом  $n$  убывают от 45% до 18%, а для графена на ней — 6 пиков (при этом интенсивности первых двух падают до 10%).

Методами спектроскопії повного струму і контактної різниці потенціалів у Андерсоновому варіанті вивчено вплив східчастого нагріву в діпазоні 1300–2800 К у вакуумі до  $5 \cdot 10^{-10}$  Па на роботу виходу  $\phi$  і відбивання повільних електронів ( $E = 0-50$  еВ) від грані (110)W. Встановлено, що при 2400 К на ній формується внаслідок сегрегації моношар вуглецю (графен) з  $\phi = 5,08 \pm 0,02$  еВ. Підвищення температури до 2800 К і оброблення в кисні видаляють Карбон і утворюється атомарно-чиста грань (110)W з  $\phi = 5,30$  еВ. Спостерігаються піки коефіцієнта відбивання електронів від цих поверхонь. Встановлено, що їх енергетичне положення ( $E$ ) пропорційне квадрату порядкового номера ( $n$ ) піка, що пояснюється квантово-розмірними ефектами при надбар'єрному відбиванні електронів. Для грані (110)W спостерігаються 3 піки, інтенсивності яких із ростом  $n$  зменшуються від 45% до 18%, а для графену на ній — 6 піків (при цьому інтенсивності перших двох зменшуються до 10%).

The effect of the step-by-step heating in the range of 1300–2800 K under vacuum up to  $5 \cdot 10^{-10}$  Pa on both the work function  $\phi$  and the slow-electron ( $E = 0$ –50 eV) reflection from the (110)W face are studied by the total current spectroscopy and contact potential difference by means of the Anderson method. As revealed, at 2400 K, a monolayer of carbon (graphene) with  $\phi = 5.08 \pm 0.02$  eV is formed on this face because of segregation of C from a bulk. Increasing the temperature to 2800 K and oxygen treatment remove carbon and form atomically clean (110)W face with  $\phi = 5.30$  eV. Peaks of electron reflection coefficient are observed from these surfaces. As found, their energy position ( $E$ ) is proportional to the square of the serial number ( $n$ ) of the peak due to quantum-dimensional effects in the over-barrier electron reflection. For (110)W face, three peaks are observed. With increasing  $n$ , their intensities decrease from 45% to 18%, and for graphene, six peaks are observed; intensities of first two peaks drop to 10%.

**Ключевые слова:** графен, работа выхода, коэффициент отражения электронов, спектроскопия полного тока.

*(Получено 15 июля 2014 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Графен — слой атомов углерода толщиной в один атом, соединённых посредством  $sp^2$ -связей в гексагональную двумерную кристаллическую решётку. Его можно ещё представить как одну плоскость графита отделившую от объёмного кристалла. По оценкам графен обладает уникально высокими механическими, теплофизическими и электрическими свойствами. Его модуль Юнга —  $E \cong 1$  ТПа; для сравнения — у самого тугоплавкого металла вольфрама  $E = 0,40$  ТПа. Коэффициент теплопроводности графена  $\lambda \cong 5 \cdot 10^3$  Вт/(м·К) на порядок больше теплопроводности меди  $4 \cdot 10^2$  Вт/(м·К) [1], а подвижность носителей тока на три порядка больше, чем у меди при комнатной температуре. Это всё свидетельствует о широких перспективах графена для использования в самих различных приложениях [2].

Ранее теоретически было доказано [3, 4], что свободную идеальную двумерную плёнку получить невозможно из-за нестабильности, которая вызывает её плавление и скручивание, однако, на слое диэлектрика  $\text{SiO}_2$  она сохраняет свою форму [5]. Одной из основных особенностей электронной структуры графена является линейная дисперсионная зависимость энергетического спектра электронов и дырок в точках соприкосновения валентной зоны и зоны проводимости вблизи уровня Ферми в районе точки  $K$  зоны Бриллюэна (точка Дирака), где эффективная масса для электронов и дырок равна нулю. Эти давние теоретические выводы получили экспериментальное подтверждение в работе [6]. Именно безмассовость квазичастиц в графене и линейность дисперсионных соотношений

обеспечивают аномально высокую проводимость и многие другие его уникальные свойства [7]. В монокристалле графита эти эффекты исчезают в результате нарушения сопряжённости электронных и дырочных состояний при сдвиге одной графитовой плоскости относительно другой. При этом линейная дисперсионная зависимость преобразуется в параболическую, и теряются уникальные свойства, характерные для графена.

Графеновые слои, которые образуются на поверхности металлов, изучались достаточно давно. При этом, гексагональная структура моноатомного углеродного слоя обнаружена на многих металлах Ni(111) [8], Pd(100) и Pd(111) [9], Mo(110) [10], Re(1010) [11], Ir(111) [12], Pt(111) [13]. Она изучалась методами оже-спектроскопии и дифракции медленных электронов на Pt(111) и Pt(100) [14], Ru, Rh [15], Ni(111) [8], Ir(111) и Ir(100) [16] и Re [17]. С помощью определения энергетических потерь электронов при скользящем падении с преобразованием Фурье (SEELFS) [18] и дифракции медленных электронов (ДМЭ) [19] было показано, что образующиеся слои действительно имеют графеновую структуру. Существование большого зазора между моноатомным слоем графита и металлом ( $h \approx 0,3$  нм) впервые доказано в работе [18] для поверхности Ni(111). В работах [17, 23] отмечается, что ненасыщенные краевые атомы углерода в графеновых островках химически связываются с атомами металла-подложки, а валентно насыщенный слой графена притягивается к поверхности металла слабыми силами Ван-дер-Ваальса [20]. Это означает, что плёнка графена как бы «приподнята» над поверхностью подложки и «не замечает» структуру поверхности металла. В работах [21, 22] показано, что количество атомов углерода в островке, когда его, в какой-то мере, можно считать графеновым, составляет несколько десятков. Такое состояние системе выгодно, так как крайние атомы островка  $C_{кр}$  связаны с поверхностью подложки гораздо сильнее и как бы «пришивают» островок к поверхности. Именно через эти атомы графеновые островки контактируют с подложкой, и через них осуществляется обмен атомами С между графеном и хемосорбированным поверхностным углеродом. При поступлении извне нового углеродного материала островки растут по площади, затем сливаются и образуют сплошной графеновый слой. В дальнейшем было показано [22], что это типичная ситуация для многих систем Me–С.

Наиболее чувствительным к возбуждению валентных состояний оказался метод низкоэнергетической спектроскопии полного тока (СПТ). Он является разновидностью метода вторичной электронной спектроскопии, но в нём отсутствуют нежелательные факторы, связанные с процессами кратных взаимодействий. В работах [23, 24] этим методом было установлено, что углерод является наиболее трудноудаляемой примесью с поверхности тугоплавких металлов,

несмотря на его низкую концентрацию ( $\cong 10^{-4}\%$  масс.) в объёме. При измерении коэффициента отражения электронов метод позволяет обеспечить чувствительность до сотой доли монослоя адсорбированной примеси, что выше чувствительности метода контактной разности потенциалов (КРП). Настоящая работа посвящена изучению влияния монослоя углерода (графена) на грани (110)W на отражение медленных (0–50 эВ) электронов и работу выхода.

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Метод СПТ использовался для получения спектра отражения медленных электронов от грани (110)W и от монослоя углерода, сформированного на её поверхности. Исследования выполнялись в сверхвысоковакуумной (до  $5 \cdot 10^{-10}$  Па) установке [25]. При отжигах давление не превышало  $1 \cdot 10^{-7}$  Па, а при измерениях —  $1 \cdot 10^{-9}$  Па. Поток электронов из трёхэлектродной пушки (катод и две диафрагмы) направлялся на исследуемый образец, расположенный на расстоянии от неё 5 мм (схема типа плоского конденсатора). Эта же пушка использовалась для измерения работы выхода  $\phi$  методом КРП в варианте Андерсона с учётом изменения отражения электронов, но без учёта энергетического разброса электронов в пучке. Вторичные электроны попадали на ближайшую к образцу диафрагму с потенциалом 15 В, что позволяло по виду ВАХ получать информацию о полном коэффициенте вторичной эмиссии в диапазоне энергий 1–15 эВ.

Образцы обезгаживались нагревом электронной пушкой в диапазоне температур 1400–2800 К, измеряемых микропирометром ВИМП-015 и термопарой ВР5-ВР20. Процессы обезгаживания и обезуглероживания контролировали масс-спектрометром МХ7301. Работу выхода измеряли относительно эталонных монокристаллов W с гранями (110) и (100), которые тщательно прогревали до высоких температур и обезуглероживали до тех пор, пока не достигалась стабилизация, как значения  $\phi$ , так и вида СПТ.

Образцы для эмиссионно-адсорбционных исследований диаметром 10 мм и толщиной 2 мм вырезали электроэрозионным способом из монокристалла вольфрама ориентации (110), выращенного электронно-лучевой бестигельной зонной плавкой. Точность ориентировки  $20'$ , а поверхность разреза механически шлифовали и электрополировали.

Для очистки от примесей монокристаллы вольфрама отжигались в диапазоне 1300–2800°C ступенчато, через 200°C с выдержкой в течение 1–2 часов при каждой температуре. После каждого отжига снимались ВАХ и определялись значения  $\phi$ . Работа выхода катода измерительной пушки  $\phi = 4,55$  эВ.

Обогащение поверхности грани (110)W углеродом происходит

при 2300 К. Монослой углерода на поверхности грани (110)W формировался путём сегрегации его из объёма при прогреве до 2400 К, при этом её вакуумная работа выхода составляла 5,08 эВ. Атомарно-чистая грань (110)W получалась многоступенчатым прогревом до 2800 К. Последующие отжиги при 2700–2800°C, а также обработка в потоке кислорода не приводили к изменению ВАХ и  $\phi$  кристаллов; это позволяет утверждать, что полученные ВАХ и значения  $\phi$  характеризуют атомарно-чистую поверхность монокристаллов вольфрама, свободную от углерода и других газовых примесей с работой выхода 5,30 эВ.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 1 приведены спектры полного тока образцов (110)W и (110)W + C. Видно, что вид ВАХ образца с углеродом на поверхности существенно отличается от вида ВАХ атомарно-чистой поверхности. С ростом энергии электронов коэффициент прохождения для (110)W + C имеет более сложную зависимость (рис. 1.).

После преобразования, приведённых на рис. 1 спектров полного

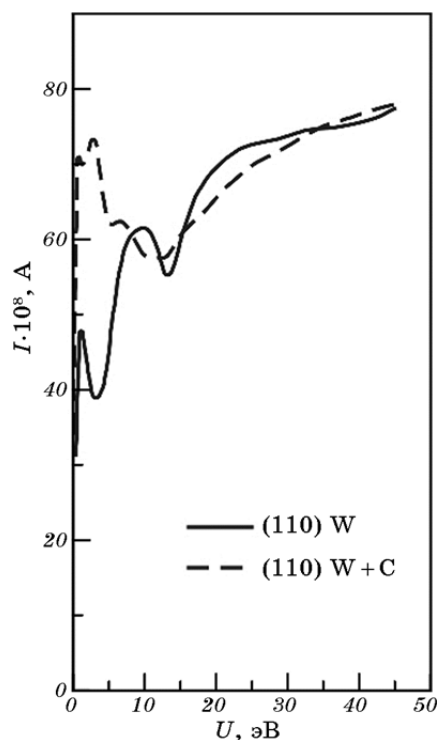
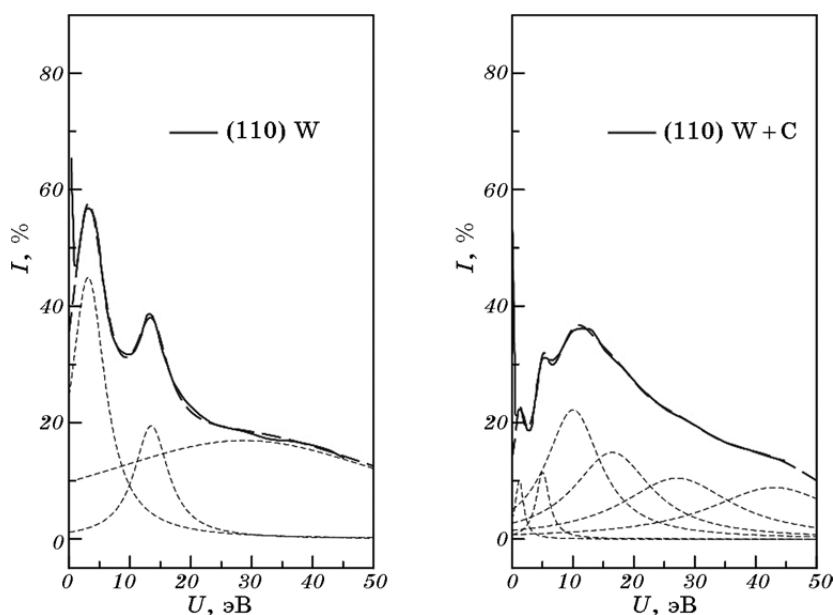


Рис. 1. Спектр полного тока (ВАХ) образцов (110)W и (110)W + C.

тока, получаем для исследуемых поверхностей энергетическую зависимость коэффициента отражения медленных электронов  $I(E)$ , определяемого как отношение плотностей потока отражённых и падающих электронов. Спектры отражения  $I(E)$  электронов от грани (110)W без углерода и с углеродом на поверхности приведены на рис. 2. Для атомарно-чистой грани металла спектр удовлетворительно аппроксимируется тремя, а с углеродом на ней — шестью компонентами лоренцевой формы.

Энергетические положения всех экстремумов на спектрах (рис. 2) исследуемых образцов приведены в таблице.

Из рисунка 2 видно, что интенсивность первого пика для атомарно-чистой грани (110)W достигает необычно высокого значения 44% при  $E \approx 3$  эВ, что отрицательно сказывается на работе термоэмиссионного преобразователя тепловой энергии в электрическую, для которых предназначаются подобные электроды. Интенсивности максимумов отражения с ростом энергии электронов  $E$  убывают для второго пика до 19%, а для третьего — до 18%. Спектр отражения электронов для грани (110)W с монослоем углерода на поверхности имеет более сложную форму: наблюдается уменьшение в 2–3 раза коэффициента отражения при  $E < 5$  эВ, вклад в который дают два узких пика при 1,2 и 5 эВ (рис. 2, справа) с интенсивностью по 10%, а при  $E > 5$  эВ наблюдается семейство из четырёх



**Рис. 2.** Спектр отражения электронов от грани (110)W без углерода и с углеродом на поверхности и его аппроксимация функциями Лоренца.

**ТАБЛИЦА.** Энергетическое положение экстремумов на спектрах исследуемых образцов.

Состояние образца	Энергетическое положение экстремумов, эВ					
	$E_{\max 1}$	$E_{\max 2}$	$E_{\max 3}$	$E_{\max 4}$	$E_{\max 5}$	$E_{\max 6}$
(110)W	3,1 (2,8)	13,5 (13,1)	28,7	–	–	–
(110)W + C	1,2	5	10	16,5	27,1	43

широких линий. Оно, очевидно, связано с отражением электронов от металлической грани (110), на которой находится графен. В общих чертах имеется сходство этого семейства (рис. 2, справа) с семейством линий отражения электронов от атомарно-чистой грани (110)W (рис. 2, слева). Отличия состоят в смещении первых относительно вторых в сторону больших значений  $E$ . Эти энергетические потери связаны с преодолением электронами слоя графена.

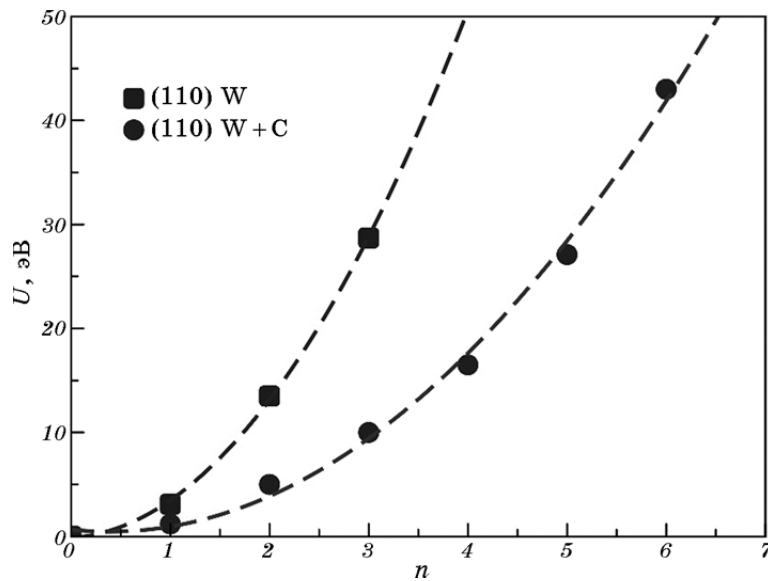
#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При переходе электрона с энергией  $E$  из вакуума в твёрдое тело он движется над потенциальным барьером высотой  $U_0$  (уровень электрона в вакууме) и проходит над ним, так как  $E > U_0$ . Согласно законам квантовой механики, учитывающей волновые свойства электронов, имеется вероятность и отражения частицы от потенциального барьера, то есть наблюдается аномальный, с точки зрения классической механики, эффект — надбарьерное отражение электронов [26, 27]. В этом случае электроны, движущиеся к барьеру из вакуума, имеют такую же вероятность отразиться от него, что и электроны, движущиеся к барьеру с той же энергией со стороны металла, изменяется только фаза отражённой волны, при этом вероятности прохождения и отражения определяются отношением  $\alpha = E/U_0$ . В случае движения электронов, представляющих собой плоскую волну, над потенциальной ямой также возможно отражение электронов. Важным для этого является только наличие областей с резким изменением потенциала [28]. При надбарьерном прохождении электрона формируется как упругий, так и неупругий отражённый электронный поток, интенсивность которого определяется энергией электронов, высотой и формой барьера, характером взаимодействия как с отдельными атомами, так с и электронной подсистемой твёрдого тела. При упругом рассеянии происходит такое взаимодействие электронов, при котором направление их скорости изменяется, а энергия остаётся неизменной. При неупругом рассеянии энергия отражённых электронов может иметь любое значение в рассматриваемом интервале значений  $E$ .

Из рисунка 2 следует, что коэффициент отражения электронов осциллирует и затухает с увеличением энергии. В случае двухслойной системы графен–металл имеем несимметричную потенциальную яму, образованную со стороны углерода — барьером конечной высоты  $U_0$ , а со стороны металла — более низким барьером конечной ширины. Наиболее вероятно упругое отражение электронов от графена при  $E \cong 1$  эВ происходит от ковалентных  $\sigma$ -связей, образующих валентную зону, а пик отражения при  $E = 5$  эВ, возможно, связан с «захватом» электронов положительно заряженными остовами углерода ( $C^{4+}$ ), образующими потенциальные ямы в графене, при этом энергия первичного (возбуждающего) электрона без потерь энергии передаётся выбиваемому (вторичному) валентному электрону. В результате он может перейти из графена через потенциальный барьер в вакуум или путём туннелирования на незаполненные состояния металла выше уровня Ферми. Третий наиболее интенсивный и широкий максимум означает, что при энергии первичных электронов  $E = 10$  эВ отражение оказывается наиболее эффективным (22%). Оно вызвано, очевидно, отражением электронов, прошедших сквозь графен, от металла и вышедших через графен в обратном направлении. В этом случае суммарные энергетические потери в графене составляют около 7 эВ. Из таблицы следует, что с ростом энергии первичных электронов энергетические потери при прохождении электронов сквозь графен снижаются. Это означает уменьшение эффективности «захвата» электронов графеном с увеличением энергии  $E$  и увеличение вероятности надбарьерного прохождения электронов до металла и отражения от него. Если же электроны попадают в незаполненные состояния ниже уровня вакуума, то их обратная эмиссия становится невозможной [29].

Неупругое отражение электронов носит сложный характер и определяется механизмом взаимодействия, как с отдельными атомами, так и с электронной подсистемой твёрдого тела и сопровождается возбуждением межзонных переходов, примесных и дефектных локализованных состояний, а также плазменных колебаний. По мере роста энергии первичных электронов происходит «включение» новых каналов неупругого взаимодействия, при этом уменьшается компонента упругого отражения. Однако на порогах возбуждения плазмонов (коллективных колебаний) при энергии первичного электрона в интервале 10–20 эВ с наибольшей вероятностью может наблюдаться эффект резонансного увеличения упругого отражения, то есть обратной эмиссии электронов [30]. Энергетическая зависимость вероятностей упругого и неупругого рассеяния определяется характерной структурой плотности состояний и будет зависеть от фундаментальных свойств энергетической структуры валентных и свободных состояний материала. Несмотря на сложность этих процессов, в эксперименте всё же наблюдается до-





**Рис. 3.** Энергетическое распределение максимумов коэффициентов отражения от атомарно-чистой грани (110)W без углерода и с монослоем углерода на поверхности от порядкового номера линий.

вольно простая закономерность. На рисунке 3 построены значения энергии максимумов коэффициентов отражения от атомарно-чистой грани (110)W и от монослоя углерода на её поверхности в зависимости от порядкового номера пика ( $n$ ), начиная от нулевых значений энергии. Видно, что для каждой кривой  $E = f(n)$  положение всех пиков отражения электронов  $E_n$  хорошо описываются параболическими зависимостями  $E_n \propto n^2$  (где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ) с достоверностью аппроксимации не хуже 0,995 в обоих случаях.

При надбарьерном прохождении квантовых частиц возможно проявление квантово-размерных эффектов, которое реализуется в эксперименте в виде квазипериодических осцилляций коэффициента прохождения и надбарьерного отражения электронов. Период осцилляций соответствует условию [27]:

$$K_{2,n}L = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где  $K_{2,n} = (2mE_{2,n})^{1/2}/\hbar$ ,  $E_{2,n} = E - U_0$ , а  $L$  — ширина потенциальной ямы. Выражение для случая бесконечно высоких стенок имеет вид [27, 28]:

$$E_{2,n} = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2mL^2}.$$

Резонансные значения энергии  $E_{2,n}$  совпадают с энергией  $n$ -го уровня потенциальной ямы. Из рисунка 3 видно, что при увеличении энергии коэффициент отражения электронов осциллирует, а положение трёх первых линий на энергетической шкале для грани (110)W с графеном на поверхности и период осцилляций в 2,7 раза ниже, чем для вольфрама. Последнее может быть связано с уширением потенциальной ямы моноатомного слоя углерода на грани (110)W из-за ван-дер-ваальсовой составляющей связи графена с металлом. Это является важным для снижения коэффициента отражения электронов в термоэмиссионных преобразователях. Насыщенные химические связи снижают поверхностную энергию Гиббса в случае расположения графеновых островков параллельно атомарно чистым граням металла, а сильная (ковалентная) связь графена с поверхностью металла на краю островка по всему его периметру обеспечивает его высокую термическую (2400 К) стабильность.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Для атомарно-чистой грани (110)W наблюдается 3 пика коэффициента отражения электронов, интенсивности которых с ростом номера пика убывают от 45% до 18%. При формировании монослоя углерода на грани (110)W число пиков увеличивается до 6, при этом период осцилляции в 2,7 раза ниже, чем для вольфрама, а интенсивность первых двух падает до 10%.

2. Положение максимумов коэффициентов отражения от атомарно-чистой грани (110)W и от монослоя углерода на её поверхности хорошо описываются квадратичными зависимостями  $E_n \propto n^2$  с достоверностью аппроксимации не хуже 0,995 в обоих случаях, и объясняется проявлением квантово-размерных эффектов в отражении электронов.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, and C. Ning Lau, *Nano Lett.*, **8**: 902 (2008).
2. Zh. Chen, Yu-M. Lin, M. J. Rooks, and Ph. Avouris, *Phys. E*, **40**: 228 (2007).
3. H. Shioyama, *J. Mater. Sci. Lett.*, **20**: 499 (2001).
4. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Статистическая физика* (Москва: Физматлит: 2001).
5. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science*, **306**: 666 (2004).
6. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, *Nature*, **438**: 197 (2005).
7. А. М. Шикин, А. Г. Рыбкин, Д. Е. Марченко, А. А. Попова, А. Ю. Варыхалов, О. Радер, *Российские нанотехнологии*, **6**, № 9–10: 114

- (2011).
8. M. Eizenberg and J. M. Blakely, *Surf. Sci.*, **82**: 228 (1979).
  9. J. C. Hamilton and J. M. Blakely, *Surf. Sci.*, **91**: 199 (1980).
  10. E. Gillet, *J. Less-Common Met.*, **71**: 277 (1980).
  11. Н. Р. Галль, С. Н. Михайлов, Е. В. Рутьков, А. Я. Тонтегоде, *Поверхность. Физика, химия, механика*, № 8: 58 (1986).
  12. Е. В. Рутьков, А. Я. Тонтегоде, *ЖТФ*, **52**, № 5: 921 (1982).
  13. Е. В. Рутьков, *ЖТФ*, **63**, № 3: 122 (1993).
  14. R. P. Merrill and D. L. Smith, *Surf. Sci.*, **21**: 203 (1970).
  15. J. T. Grant and T. W. Haas, *Surf. Sci.*, **21**: 76 (1970).
  16. В. Н. Агеев, Е. В. Рутьков, А. Я. Тонтегоде, Н. А. Холин, *Физика твёрдого тела*, **24**, № 3: 780 (1982).
  17. Н. Р. Галль, М. С. Кобрин, С. Н. Михайлов, Е. В. Рутьков, А. Я. Тонтегоде, *Поверхность. Физика, химия, механика*, № 9: 21 (1984).
  18. R. Rosei, M. De Cresceci, F. Sette, C. Quaresima, A. Savoia, and P. Perfetti, *Phys. Rev. B*, **28**: 1161 (1983).
  19. Hu Zi-Pu, D. F. Ogletree, M. A. Van Hove, and G. A. Somorjai, *Surf. Sci.*, **180**: 433 (1987).
  20. А. Я. Тонтегоде, *Prog. Surf. Sci.*, **38**: 201 (1991).
  21. Н. Д. Потехина, *Поверхность. Физика, химия, механика*, № 4: 14 (1987).
  22. Е. В. Рутьков, Н. Р. Галль, *Физика твёрдого тела*, **51**, № 8: 1639 (2009).
  23. В. И. Силантьев, Н. А. Шевченко, Б. Я. Меламед, *Український фізичний журнал*, **24**, № 8: 1227 (1979).
  24. В. И. Силантьев, Н. А. Шевченко, *Высокочистые вещества*, **4**: 197 (1988).
  25. Б. Я. Меламед, В. И. Силантьев, Н. А. Шевченко, *Физические методы исследования металлов* (Киев: Наукова думка: 1981).
  26. С. А. Комолов, *Интегральная вторично-электронная спектроскопия поверхности* (Ленинград: Изд. Ленинградского университета: 1986).
  27. В. Е. Борисенко, А. И. Воробьёва, Е. А. Уткина, *Нанoeлектроника* (Москва: БИНОМ: 2009).
  28. В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин, *Основы нанoeлектроники* (Москва: Лотос: 2006).
  29. И. М. Бронштейн, Б. С. Фрайман, *Вторичная электронная эмиссия* (Москва: Наука: 1969).
  30. Ю. А. Кухаренко, С. А. Фридрихов, *Поверхность. Физика, химия, механика*, № 1: 43 (1982).

## REFERENCES

1. A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, and C. Ning Lau, *Nano Lett.*, **8**: 902 (2008).
2. Zh. Chen, Yu-M. Lin, M. J. Rooks, and Ph. Avouris, *Phys. E*, **40**: 228 (2007).
3. H. Shioyama, *J. Mater. Sci. Lett.*, **20**: 499 (2001).
4. L. D. Landau and E. M. Lifshits, *Statisticheskaya Fizika [Statistical Physics]* (Moscow: Fizmatlit: 2001) (in Russian).
5. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science*, **306**: 666 (2004).
6. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, *Nature*, **438**: 197 (2005).

7. A. M. Shikin, A. G. Rybkin, D. E. Marchenko, A. A. Popova, A. Yu. Varykhalov, and O. Rader, *Rossiyskie Nanotekhnologii*, **6**, Nos. 9–10: 114 (2011) (in Russian).
8. M. Eizenberg and J. M. Blakely, *Surf. Sci.*, **82**: 228 (1979).
9. J. C. Hamilton and J. M. Blakely, *Surf. Sci.*, **91**: 199 (1980).
10. E. Gillet, *J. Less-Common Met.*, **71**: 277 (1980).
11. N. R. Gall', S. N. Mikhaylov, E. V. Rut'kov, and A. Ya. Tontegode, *Poverkhnost'. Fizika, Khimiya, Mekhanika*, No. 8: 58 (1986) (in Russian).
12. E. V. Rut'kov and A. Ya. Tontegode, *Zhurn. Tekhn. Fiz.*, **52**, No. 5: 921 (1982) (in Russian).
13. E. V. Rut'kov, *Zhurn. Tekhn. Fiz.*, **63**, No. 3: 122 (1993) (in Russian).
14. R. P. Merrill and D. L. Smith, *Surf. Sci.*, **21**: 203 (1970).
15. J. T. Grant and T. W. Haas, *Surf. Sci.*, **21**: 76 (1970).
16. V. N. Ageev, E. V. Rut'kov, A. Ya. Tontegode, and N. A. Kholin, *Fizika Tverdogo Tela*, **24**, No. 3: 780 (1982) (in Russian).
17. N. R. Gall', M. S. Kobrin, S. N. Mikhaylov, E. V. Rut'kov, and A. Ya. Tontegode, *Poverkhnost'. Fizika, Khimiya, Mekhanika*, No. 9: 21 (1984) (in Russian).
18. R. Rosei, M. De Cresceci, F. Sette, C. Quaresima, A. Savoia, and P. Perfetti, *Phys. Rev. B*, **28**: 1161 (1983).
19. Hu Zi-Pu, D. F. Ogletree, M. A. Van Hove, and G. A. Somorjai, *Surf. Sci.*, **180**: 433 (1987).
20. A. Ya. Tontegode, *Prog. Surf. Sci.*, **38**: 201 (1991).
21. N. D. Potekhina, *Poverkhnost'. Fizika, Khimiya, Mekhanika*, No. 4: 14 (1987) (in Russian).
22. E. V. Rut'kov and N. R. Gall', *Fizika Tverdogo Tela*, **51**, No. 8: 1639 (2009) (in Russian).
23. V. I. Silantiev, N. A. Shevchenko, and B. Ya. Melamed, *Ukrayins'kyi Fizychnyy Zhurnal*, **24**, No. 8: 1227 (1979) (in Russian).
24. V. I. Silant'ev and N. A. Shevchenko, *Vysokochistye Veshchestva*, **4**: 197 (1988) (in Russian).
25. B. Ya. Melamed, V. I. Silantiev, and N. A. Shevchenko, *Fizicheskie Metody Issledovaniya Metallov [Physical Methods of Investigation of Metals]* (Kiev: Naukova Dumka: 1981) (in Russian).
26. S. A. Komolov, *Integral'naya Vtorichno-Ehlektronnaya Spektroskopiya Poverkhnosti [Integral Secondary-Electron Spectroscopy of a Surface]* (Leningrad: Izd. Leningrad Univ.: 1986) (in Russian).
27. V. E. Borisenko, A. I. Vorob'eva, and E. A. Utkina, *Nanoelektronika [Nanoelectronics]* (Moscow: BINOM: 2009) (in Russian).
28. V. P. Dragunov, I. G. Neizvestnyy, and V. A. Gridchin, *Osnovy Nanoelektroniki [Fundamental Nanoelectronics]* (Moscow: Lotos: 2006) (in Russian).
29. I. M. Bronshteyn and B. S. Frayman, *Vtorichnaya Ehlektronnaya Emissiya [Secondary Electron Emission]* (Moscow: Nauka: 1969) (in Russian).
30. Yu. A. Kukharenko and S. A. Fridrikhov, *Poverkhnost'. Fizika, Khimiya, Mekhanika*, No. 1: 43 (1982) (in Russian).