

## Кинетика роста графеновых и графитовых пленок на поверхности $(10\bar{1}0)\text{Re}$

© Е.В. Рутьков, Н.Р. Галль, Н.Д. Потехина

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: gall@ms.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 3 декабря 2013 г.)

Исследована кинетика роста графеновых и графитовых слоев на поверхности насыщенного углеродом рения. Получено хорошее согласие данных эксперимента с результатами математического анализа диффузионных процессов в объеме металла с участием атомов углерода с последующим выделением его на поверхности. Установлено, что в области температур 1300–1500 К можно выращивать графеновые слои на металле строго заданной толщины в диапазоне 1–50 слоев.

### 1. Введение

В связи с большим интересом к графену встает важный вопрос о выращивании графеновых слоев определенной толщины, так как свойства пленок существенно зависят от количества слоев графена в них [1,2].

Одним из способов выращивания таких пленок является их формирование на поверхности металлов и непроводящих карбидов с последующим удалением подложки, например, путем травления металла [3–10].

Система рений–углерод была нами подробно исследована в работах [10–12]. В настоящей работе изучается кинетика образования пленок графена на  $\text{Re}(10\bar{1}0)$  при температурах  $T = 1250\text{--}1700\text{ К}$ .

### 2. Методика эксперимента

Эксперименты проводились в сверхвысоковакуумном Оже-спектрометре высокого разрешения ( $\Delta E/E \sim 0.1\%$ ) с дополнительным модулем, позволяющим применять для диагностики поверхности образцов метод термоэлектронной эмиссии и метод зондирования поверхности молекулами CsCl для определения относительной площади графеновых островков [10].

В качестве подложки использовались текстурированные рениевые ленты размером  $50 \times 1.5 \times 0.02\text{ мм}$  с гранью  $(10\bar{1}0)$  на поверхности, однородные по работе выхода  $e\phi = 5.15\text{ эВ}$ . Методика очистки лент от примесей и выведения грани на поверхность была стандартной [10,11]. По данным рентгеновской дифракции степень ориентации грани  $(10\bar{1}0)$  по отношению к поверхности образца составляла 99.9%.

Насыщение рения углеродом производилось в паре бензола, напускаемых в камеру из специальной системы напуска при давлении  $P_{\text{C}_6\text{H}_6} = 1 \cdot 10^{-5}\text{ Торр}$  и температуре  $T_C = 1900\text{--}2050\text{ К}$ . Процесс насыщения углеродом заканчивался „автоматически“ при образовании сплошного слоя графена на рении, так как на пассивной поверхности сплошного слоя графена молекулы  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,

поставляющие атомы углерода для их перехода с поверхности в объем, перестают диссоциировать [11]. Метод электронной Оже-спектроскопии (AES) позволяет по форме Оже-спектра установить, что образовалась действительно графеновая пленка углерода толщиной в один слой [10]. Метод зондирования поверхности молекулами CsCl показывает, что пленка сплошная [11]. Прямые опыты с применением сканирующей туннельной микроскопии также подтвердили графеновую структуру пленки и ее непрерывность [13].

### 3. Экспериментальное изучение кинетики роста графеновых и графитовых пленок на $\text{Re}(10\bar{1}0)$

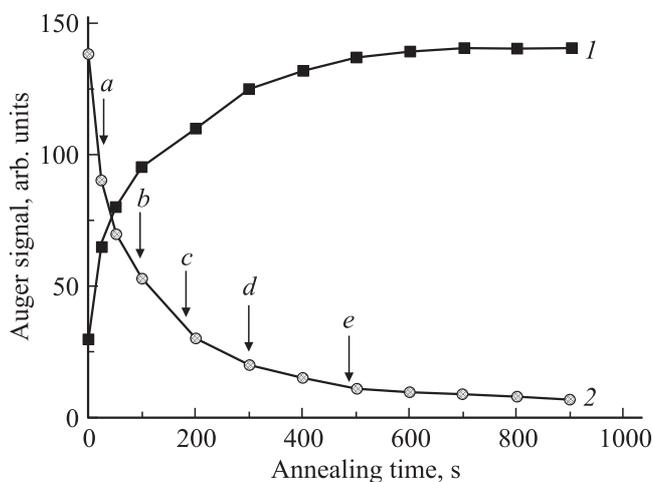
Атомы углерода активно и в заметных количествах растворяются в объеме рения [14]. Для области температур 1500–2100 К с использованием калиброванных потоков в настоящей работе была определена предельная растворимость  $n_C$  (at.%) атомов углерода в рении:  $\lg n_C$  (at.%) =  $2.48 - \frac{4000}{T}$ , где температура измеряется в градусах Кельвина [15]. Критерием достижения предельной растворимости служило образование новой фазы углерода — графеновых островков на поверхности металла, находящихся в динамическом равновесии с хемосорбированным углеродом ( $N_C = 2 \cdot 10^{15}\text{ atom/cm}^2$  [11]).

Если температуру насыщенного углеродом рения  $T$  поднять выше температуры насыщения  $T_C$  до  $T \geq T_C + 100\text{ К}$ , то графеновые островки быстро разрушаются и на поверхности остаются только хемосорбированные атомы углерода. Если температуру понизить до  $T \leq T_C$ , то избыточный углерод выделяется на поверхности и снова образует островки графена, затем сплошной слой графена и графит [11]. В данной работе исследуется кинетика выделения углерода из объема рения на его поверхность при разных температурах. Количество материала на поверхности определялось методом AES, методом зондирования поверхности потоком молекул CsCl, чувствительным к общей площади графе-

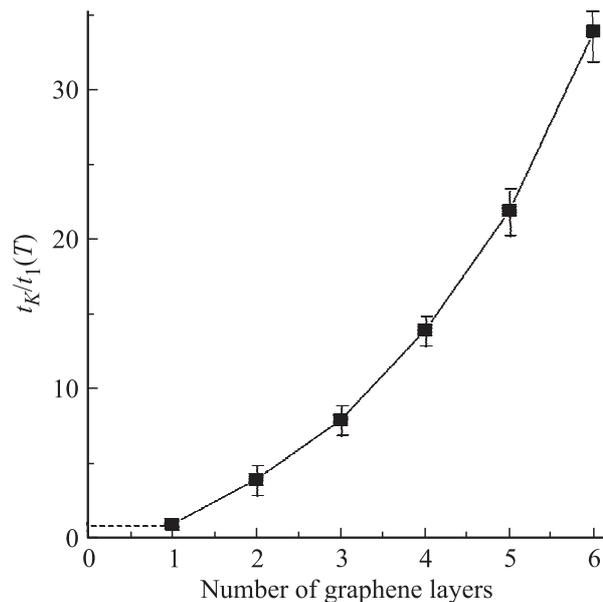
новых островков [3], или путем измерения термоэлектронной эмиссии с образца. Поскольку работа выхода островков графена на рении  $e\varphi = 4.25$  eV, а рения с хемосорбированным углеродом  $e\varphi = 5.25$  eV, наблюдаемый рост термоэлектронного тока при  $T = \text{const}$  прямо пропорционален общей площади  $S_0$  островков графена. Все три способа хорошо согласуются между собой.

На рис. 1 показана зависимость изменения интенсивности Оже-сигнала углерода (1) и рения (2) при росте пленки графита при  $T = 1390$  и  $T_C = 1900$  К, при этом вначале температуру насыщенного при  $T_C$  рения поднимали до  $T = 2200$  К, когда на поверхности присутствует только хемосорбированный углерод, затем температуру быстро уменьшали до значения  $1390$  К, при котором начинается рост островков графена. Видно, что со временем интенсивность Оже-сигнала подложки стремится к нулю, а Оже-сигнал углерода достигает насыщения, что соответствует образованию пленки графита толщиной 6–7 слоев, приблизительно равной чувствительности метода AES. Форма Оже-спектра в этом случае типична для графита [10].

Ранее было показано, что один слой графена уменьшает интенсивность Оже-сигнала рения в 1.6 раза, два слоя — в 2.56 раза, три слоя — в 4.1 раза и т.д. [10]. Воспользовавшись этими данными, с учетом послойного роста пленки [10] можно обнаружить, что время образования каждого следующего слоя возрастает ( $a, b, c, \dots$  на рис. 1). Это связано с необходимостью доставки атомов углерода со все большей глубины образца, так как лимитирующей стадией роста графита на поверхности в нашем случае является диффузия атомов углерода по объему металла [10]. Хотя, например, в случае системы Ni–C лимитирующей стадией является выход атомов углерода на поверхность из приповерхностного слоя, в то время как диффузия атомов углерода по



**Рис. 1.** Изменение интенсивности Оже-сигнала углерода (1) и рения (2) при выделении углерода из пересыщенного твердого раствора Re–C при  $T = 1390$  К ( $T_C = 1900$  К). (a–e) — время образования  $K$  слоев графена ( $K = 1–5$ ).



**Рис. 2.** Зависимость отношения времени  $t_K$  образования  $K$ -го слоя графена ко времени  $t_1(T)$  образования первого слоя графена ( $K = 1$ ) от числа слоев графена. Температура насыщения рения  $T_C = 1900$  К. Температура выделения углерода  $T = 1200–1600$  К. На рисунке указаны погрешности эксперимента.

объему никеля происходит быстро. В этом случае время образования  $K$ -го слоя графена такое же, как и для первого слоя ( $K = 1$ ) [16].

Воспользуемся известным уравнением для диффузионных процессов

$$x^2 = 2D_0 t e^{-E_d/kT}, \quad (1)$$

где  $x$  — длина диффузионного перемещения атома в данном направлении за время  $t$ ,  $E_d$  — энергия активации объемной диффузии,  $D_0$  — коэффициент диффузии.

Из уравнения (1) следует, что в случае системы рений–углерод, когда лимитирующей стадией образования слоев графена является диффузия атомов углерода в объеме рения, „полная“ длина  $x(t)$  диффузии атома углерода за время  $t$  пропорциональна количеству вышедших из объема атомов C, т.е. числу  $K$  слоев графена:  $x(t) \sim K(t)$  и  $t \sim K^2$ . Действительно, из рис. 1 видно, что для  $K = 1$  величина  $t_a = 25$  s, для  $K = 2$  —  $t_b = 100$  s, для  $K = 3$  —  $t_c \sim 200$  s, т.е.  $t_K \sim 25 K^2$  [s].

На рис. 2 представлена зависимость отношения времени  $t_K$  образования графена толщиной  $K$  слоев ко времени  $t_1$  образования первого слоя графена ( $K = 1$ ) от числа  $K$  слоев графена на поверхности для семи температур образца в диапазоне  $1200–1600$  К.

Из рис. 2 следует, что независимо от температуры  $T$  выделение углерода в диапазоне  $T = 1200–1600$  К сохраняет зависимость  $t_K/t_1 \sim K^2$ , хотя время образования одного слоя  $t_1(T)$  должно уменьшаться с ростом

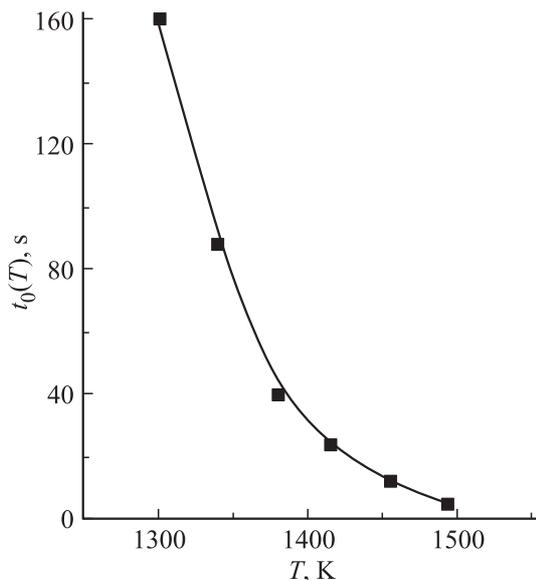
температуры в соответствии с уравнением

$$t_1 = \frac{x_1^2}{2D_0} e^{E_d/kT}. \quad (2)$$

Действительно, глубина  $x_1 = \text{const}$ , с которой поступают атомы углерода из объема Re для образования первого слоя графена, не зависит от температуры выхода атомов углерода, а определяется лишь температурой насыщения  $T_C = 1900$ . Тогда из уравнения (2) получим, что, хотя время выхода первого слоя уменьшается с ростом  $T$ , отношение  $t_K/t_1 = K^2$  и сохраняется при любых  $T$ , если  $T_C = \text{const}$ . Отметим, что нет физических причин ожидать, что механизм выделения изменится с дальнейшим ростом  $K$ . Отметим, что сохранить нужное число слоев графена можно в любой момент выключением тока накала рениевой ленты.

Ранее энергию активации  $E_d$  диффузии атомов углерода в насыщенном твердом растворе Re–C оценили как  $E_d \sim 3.2$  eV [10]. Зная предельную растворимость углерода в рении [15],  $E_d$  и  $D_0$  можно оценить более точно.

На рис. 3 показана зависимость времени образования графеновых островков  $t_0(T)$  с относительной площадью  $S_0 = 0.8$  от температуры подложки для  $T_C = 2050$  K. Вначале температуру поднимали до  $T = 2200$  K (как и в случае рис. 2), а затем резко снижали до  $T \ll T_C$  и фиксировали время образования островков графена с  $S_0 = 0.8$  методом зондирования поверхности молекулами CsCl. Видно, что время  $t_0$  ( $S_0 = 0.8$ ) сильно увеличивается с понижением температуры образца. Граничная температура, при которой еще можно за разумное время зафиксировать выделение углерода на поверхность рения из его объема, составляет  $T = 1200$  K. Отметим,



**Рис. 3.** Зависимость времени  $t_0$  образования графеновых островков с относительной площадью  $S_0 = 0.8$  от температуры  $T$  насыщенного при  $T_C = 2050$  K рения. Точки определялись с помощью соотношения (1).

что данная температура для рения на несколько сотен градусов выше, чем для других металлов, например родия, никеля, вольфрама, тантала [10,11].

Если данные для  $t_0(T)$  (рис. 3) перестроить в координатах  $\ln t_0 - 1/kT$ , то получается прямая, позволяющая найти  $E_d = 3.1 \pm 0.1$  eV, а зная предельную растворимость  $n_C(T)$  [15] углерода в рении и геометрию образца, можно при заданной температуре найти количество атомов углерода  $N'$  в каждой атомной плоскости ленты для площади  $1 \text{ cm}^2$ . Тогда глубина, с которой углерод при температуре  $T$  продиффундирует к поверхности, чтобы образовать островки графена, равна  $x = \frac{N_C S_0 a}{N'}$ , где  $N_C = 3.86 \cdot 10^{15} \cdot 0.8 = 3.1 \cdot 10^{15} \text{ atom/cm}^2$ ,  $a = 3 \text{ \AA}$  — диаметр атома рения,  $S_0 = 0.8$ . В наших опытах  $x = 90 \text{ \AA}$ , тогда из формулы (1) при данном  $t$  можно найти  $D_0 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Аналогичную обработку результатов можно найти в нашей работе по исследованию системы Ni–C [16].

Важно отметить, что в настоящей работе мы целенаправленно выбирали высокие температуры процесса насыщения, так как в этом случае концентрация избыточного углерода  $\Delta n_C = n_C(T_C) - n_C(T)$  в ленте при снижении температуры ( $T \ll T_C$ ) была практически постоянной  $\Delta n_C \cong n_C(T_C)$ , поскольку  $n_C(T) \ll n_C(T_C)$ . Величины  $E_d$  и  $D_0$  не зависели от  $T_C$  для  $T_C = 1800-2050$  K и от  $S_0$ , в том числе и для  $S_0 \leq 0.05$ , когда кинетика выхода углерода определялась по изменению термоэлектронного тока, чувствительного на самых начальных стадиях роста графеновых островков.

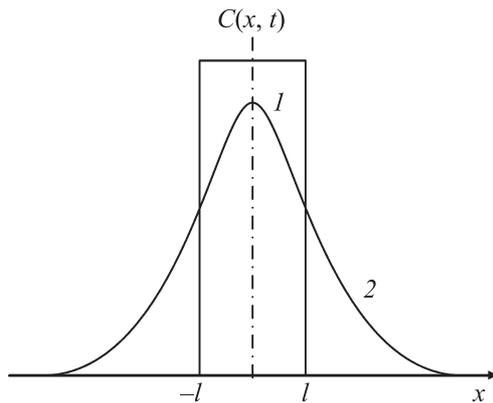
#### 4. Теоретическое рассмотрение кинетики выделения углерода на поверхность из объема пересыщенного твердого раствора Re–C

Решим задачу о количестве выделившегося при заданной температуре  $T$  углерода из пересыщенного твердого раствора в зависимости от времени  $N_C(t)$ . Рассмотрим выделение углерода на поверхности  $S = 1 \text{ cm}^2$  ленты рения толщиной  $2l = 0.002 \text{ cm}$  (рис. 4), содержащего в своем объеме  $V = S \cdot 2l = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$   $N_C = 4.5 \cdot 10^{18}$  атомов ( $T_C = 2050$  K). Температура выделения углерода на поверхность рения  $T = 1500$  K ( $T \ll T_C$ ). Выше были приведены параметры диффузии  $D(T) = 4.0 \cdot 10^{-2} e^{-\frac{3.1 \text{ eV}}{kT}} [\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ .

Диффузия атомов из слоя конечной толщины  $2l$  с двух сторон пластины определяется уравнением диффузии с начальными и граничными условиями (рис. 4)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad C|_{x=0} = \begin{cases} C_0, & -l < x < l \\ 0, & |x| > l \end{cases}, \quad \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (3)$$

где  $C(x, t)$  — концентрация вещества в точке  $x$  в момент времени  $t$ .



**Рис. 4.** Схематическая иллюстрация к задаче о диффузионных процессах с участием углерода в объеме металла с его последующим выделением на поверхности.  $l$  — половина толщины ленты;  $C(x, t)$  — распределение углерода в металле в зависимости от времени  $t$  и координаты  $x$ :  $1 - t = 0$ ,  $2 - t > 0$ . Величина  $|x| > l$  соответствует выделению углерода на поверхности образца.

Решение уравнения (3) запишется в виде [17,18]

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left( \operatorname{erf} \frac{x+l}{2\sqrt{Dt}} - \operatorname{erf} \frac{x-l}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (4)$$

где  $\operatorname{erf} \frac{x+l}{2\sqrt{Dt}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x+l}{2\sqrt{Dt}}} e^{-y^2} dy$ .

Количество углерода, вышедшего с  $1 \text{ cm}^2$  с обеих поверхностей ленты из ее объема за время  $t$ ,

$$2Q(t) = -2 \int_0^t D \left. \frac{\partial C(x, t')}{\partial x} \right|_{x=l} dt'. \quad (5)$$

Подставляя в (5) решение (4), получим

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right|_{x=l} &= \frac{C_0}{2\sqrt{\pi Dt}} \left( e^{-\frac{l^2}{Dt}} - 1 \right), \\ 2Q(t) &= \frac{C_0 D}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{dt'}{\sqrt{Dt'}} \left( 1 - e^{-\frac{l^2}{Dt'}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Используя таблицы интегралов [19], найдем из (6) количество углерода, выходящего с двух сторон пластины площадью  $S = 1 \text{ cm}^2$  и толщиной  $2l$  за время  $t$

$$2Q(t) = C_0 l \left\{ \left[ 1 - \Phi \left( \frac{l}{\sqrt{Dt}} \right) \right] + \frac{\sqrt{Dt}}{l\sqrt{\pi}} \left( 1 - e^{-\frac{l^2}{Dt}} \right) \right\}, \quad (7)$$

где  $\Phi(y)$  — функция ошибок [18,20],

$$\Phi(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-z^2} dz,$$

или в переменных  $y = \frac{l}{\sqrt{Dt}}$  ( $t = \frac{l^2}{Dy^2} = \frac{\tau_0}{y^2}$ ,  $\tau_0 = \frac{l^2}{D}$ )

$$2Q(t) = C_0 l f(y), \quad (8)$$

где

$$f(y) = [1 - \Phi(y)] + \frac{1}{y\sqrt{\pi}} (1 - e^{-y^2}). \quad (9)$$

В пластине толщиной  $2l$  и площадью  $S = 1 \text{ cm}^2$  количество атомов углерода составляет

$$\begin{aligned} N_C &= C_0 2lS = 4.5 \cdot 10^{18}, \\ C_0 l S &= \frac{N_C}{2} \Big|_{S=1 \text{ cm}^2} = \frac{N_C}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Выходящий из пластины углерод „строит“ слои графена на Ре. Учтем, что количество углерода в одном слое графена  $N_1 = 3.86 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . Тогда весь углерод пластины  $N_C$  может составить  $K_C$  слоев графена. В наших условиях

$$K_C = \frac{N_C}{N_1} = \frac{4.5 \cdot 10^{18}}{3.86 \cdot 10^{15}} = 1166. \quad (11)$$

Число слоев графена  $K(t)$ , выходящих из пластины за время  $t$ , исходя из (8) равно

$$K_C = \frac{2Q(t)}{N_1} = \frac{C_0 l S f(y)}{N_1} = \frac{N_C}{2} \frac{f(y)}{N_1},$$

или

$$K(t) = K_C f(y) / 2. \quad (12)$$

Из уравнения (9) и величин  $\Phi(y)$  в интервале  $0 < y \leq 2.5$  (см. таблицу) видно, что

$$\lim f(y) \Big|_{y>2.5} = \frac{1}{y\sqrt{\pi}}. \quad (13)$$

Из (9), (13) получаем число слоев графена, выходящих из пластины за время  $t$ ,

$$K(t) = K_C \frac{1}{2\sqrt{\pi y}}. \quad (14)$$

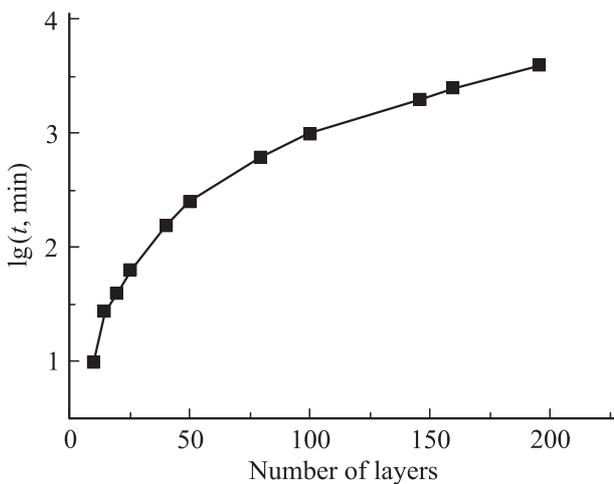
Подставив в (12)  $y = \frac{l}{\sqrt{Dt}}$ , найдем  $K(t)$

$$K(t) = \frac{K_C}{2\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{Dt}}{l} = \frac{K_C}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t}{\tau_0}}, \quad (15)$$

так как  $\tau_0 = \frac{l^2}{D(T)}$ .

Значения функций, входящих в формулу (9) при разных  $t$

$t = \frac{\tau_0}{y^2}$ , h	$y$	$1 - \Phi(y)$	$1 - e^{-y^2}$	$f(y) = \frac{2K(t)}{K_C}$
18 100	0.1	0.8875	0.01	0.92
	0.5	0.4795	0.2212	0.62
	1.0	0.1573	0.6321	0.36
42.25	2.0	0.0037	0.9817	0.16
29	2.5	0.0004	0.9981	0.13



**Рис. 5.** Расчетная кривая логарифма времени, необходимого для образования  $K$  слоев графена на рении при  $T = 1500$  K ( $T_C = 2050$  K), полученная на основе уравнения (16). Точки получены на основе соотношения  $t_K = K^2 t_1$  ( $t_1$  — время образования первого слоя графена).

Используя  $D(T) = 4.0 \cdot 10^{-2} e^{-\frac{3146}{T}} [\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ , получим  $D(T = 1500 \text{ K}) = 1.535 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  и  $\tau_0 \approx 181 \text{ h}$ .

С учетом  $\frac{K_C}{2\sqrt{\pi}} = \frac{1166}{2\sqrt{\pi}} = 328.92$  и  $\sqrt{\tau_0} = 13.45 \text{ h}^{1/2}$  получим из (15) число слоев графена за время  $t$

$$K(t) = 24.45\sqrt{t_h} = 189.4\sqrt{t_{\min}}. \quad (16)$$

На рис. 5 приведена полученная на основе уравнения (16) расчетная кривая логарифма времени образования  $K$  слоев графита на рении для упомянутых выше параметров (сплошная линия). Точками представлены результаты, найденные при использовании уравнения (1) с учетом экспериментального времени  $t_1$  образования первого слоя графена, при этом  $t_K \sim K^2 t_1$ .

Необходимо отметить, что за разумное время (часы) на поверхности рения удастся вырастить пленки толщиной  $\sim 50$  слоев. Как видно из расчетов, чтобы весь углерод вышел из объема рения, требуется огромное время.

## 5. Обсуждение результатов

Из всех изученных нами ранее систем металл–углерод: Ir(111)–C, Mo(100)–C, Ni(111)–C, Rh(111)–C, Pt(111)–C [10,11], позволяющих выращивать на поверхности графеновые и графитовые пленки, рений оказался наиболее „удобным“ материалом, так как, с одной стороны, в нем хорошо и в значительных количествах растворяется углерод, а с другой — процессы выделения углерода из объема на его поверхность протекают за разумное время. Это позволяет эффективно контролировать процессы образования графитовых пленок заданной толщины.

Иридий — металл, практически не растворяющий атомы углерода, и на его поверхности образуется только один слой графена. Более толстая пленка образуется при использовании атомного потока углерода, но эффективность роста резко падает с ростом толщины пленки из-за активной десорбции поступающих атомов углерода [11]. Платина мало растворяет углерод, поэтому на ее поверхности удастся образовать только графитовые пленки менее 10 слоев. Молибден — карбидообразующий металл, поэтому при его насыщении углеродом имеется длительная стадия (часы) образования объемного карбида  $\text{Mo}_2\text{C}$  по всей толщине образца, после чего на его поверхности образуется графитовая пленка. Растворимость углерода в карбиде молибдена неизвестна, но из наших опытов следует, что толщина пленок графита на молибдене более 6–7 слоев [10].

На родии и никеле процессы объемной диффузии атомов углерода протекают быстро, и пленка графита образуется за секунды или десятки секунд, что усложняет контроль за сверхтонкими пленками графита на начальных этапах их роста. Большая растворимость углерода в родии и никеле позволяет выращивать пленки толщиной более 100 атомных слоев [10,11].

На основании данных настоящей работы можно заключить, что, зная предельную растворимость углерода в рении при температуре процесса насыщения  $T_C$  и параметры объемной диффузии углерода  $E_d$  и  $D_0$ , можно рассчитать время, необходимое для образования графитовой пленки заданной толщины при  $T \ll T_C$ .

## Список литературы

- [1] А.К. Гейм. УФН **181**, 1284 (2011).
- [2] К.С. Новоселов. УФН **181**, 1299 (2011).
- [3] А.Я. Tontegode. Progr. Surf. Sci. **38**, 201 (1991).
- [4] Y. Hernandez, V. Nicolosi, M. Lotya, F.M. Blighe, Z. Sun, S. De, I.T. McGovern, B. Holland, M. Byrne, Y.K. Gun'ko, J.J. Boland, P. Niraj, G. Duesberg, S. Krishnamurthy, R. Goodhue, J. Hutchison, V. Scardaci, A.C. Ferrari, J.N. Coleman. Nature Nanotechnol. **3**, 563 (2008).
- [5] J.T. Grant, T.W. Haas. Surf. Sci. **21**, 76 (1970).
- [6] A. Nagashima, K. Nuka, H. Itou, T. Ichinokawa, C. Oshima, S. Otani. Surf. Sci. **291**, 93 (1993).
- [7] I. Forbeaux, J.-M. Themlin, J.-M. Debever. Phys. Rev. B **58**, 16 396 (1998).
- [8] A.M. Affoune, B.L.V. Prasad, H. Sato, T. Enoki, Y. Kaburagi, Y. Hishiyama. Chem. Phys. Lett. **348**, 17 (2001).
- [9] K. Harigaya, T. Enoki. Chem. Phys. Lett. **351**, 128 (2002).
- [10] N.R. Gall, E.V. Rut'kov, A.Я. Tontegode. Int. J. Mod. Phys. B **11**, 1865 (1997).
- [11] E.V. Rut'kov, N.R. Gall. In: Physics and Applications of Graphene — Experiments. Intech Open Access Publ. (2011). Ch. 11. P. 209–292.
- [12] Н.Р. Галль, С.Н. Михайлов, Е.В. Рутьков, А.Я. Тонтегоде. ЖТФ **56**, 4, 732 (1986).

- [13] З. Вакар, Н.Р. Галль, И.В. Макаренко, Е.В. Рутьков, А.Н. Титков, А.Я. Тонтегоде, М.М. Усуфов. ФТТ **40**, 1570 (1998).
- [14] Е. Фромм, Е. Гебхардт. Газы и углерод в металлах. Metallurgia, М. (1980). 712 с.
- [15] Е.В. Рутьков, Н.Р. Галль. Письма в ЖЭТФ **98**, 375 (2013).
- [16] Е.В. Рутьков, А.Я. Тонтегоде, М.М. Усуфов. Изв. РАН. Сер. физ. **58**, 102 (1994).
- [17] Б.И. Болтакс. Диффузия в полупроводниках. Физматгиз, М. (1961). 462 с.
- [18] А.И. Райченко. Математическая теория диффузии в приложениях. Наук. думка, Киев (1981). 391 с.
- [19] И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Наука, М. (1971). 1108 с.
- [20] Е. Янке, Ф. Эмде. Таблицы функций с формулами и кривыми. ГИТТЛ, М.-Л. (1949). 420 с.