

Контролируемый рост углеродных нанотрубок и высокоупорядоченного графена на поверхности Pt(111) с использованием молекул фторфуллерена

Д.А. Музыченко,^{1,*} С.И. Орешкин,² В.О. Суров,¹ А.В. Самородский,¹
М.Ю. Александров,¹ В.И. Панов,¹ А.И. Орешкин¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра квантовой электроники
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ
Россия, 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13

(Поступила в редакцию 27.01.2025; после доработки 28.02.2025; подписана в печать 06.03.2025)

Продemonстрирована возможность использования фторфуллерена C₆₀F₄₈ для осуществления контролируемого роста углеродных нанотрубок и доменов высокоупорядоченного графена, стимулированного промежуточным фторированием поверхности платинового катализатора. Для обеспечения легкого отщепления атомов фтора от углеродного каркаса на поверхности Pt(111) была выбрана молекула C₆₀F₄₈. Показано, что молекулы фторфуллерена распадаются на поверхности Pt(111), теряя атомы фтора уже при комнатной температуре. Высокотемпературный пиролиз способствует фторированию поверхности Pt(111) и связыванию аморфного углерода, вызывая последовательный рост углеродных нанотрубок и графена при повышении температуры.

PACS: 68.37.E, 61.46.-w, 68.65.Pq УДК: 538.9

Ключевые слова: фторфуллерены, углеродные нанотрубки, графен.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2530502](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2530502)

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на тот факт, что углерод не самый распространенный элемент на Земле, он является самым универсальным химическим элементом в органической химии. На рубеже XX и XXI веков были выявлены новые аллотропные соединения углерода: фуллерены, однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ) и графен. Все эти наноструктуры содержат sp²-гибридизованный углерод и, следовательно, имеют общую природу и фундаментально связаны. Например, углеродные нанотрубки (УНТ) можно рассматривать как молекулы фуллерена, разрезанные на две идентичные половины, соединенные углеродным цилиндром, в котором атомы углерода расположены в идеальной гексагональной решетке [1]. С момента своего экспериментального обнаружения в начале XXI века графен привлекал внимание физиков во многом благодаря своей уникальной электронной структуре [2], большой механической жесткости [3], теплопроводности и подвижности носителей заряда [4, 5]. Потенциальное приложение графена в химии было осознано немногим позже. При проведении типичного гетерогенного каталитического цикла реакция углеродсодержащей молекулы на поверхности активного переходного металла (ПМ) может привести к образованию различных конденсированных углеродных

фаз. Синтез графена может быть осуществлен с использованием высокотемпературного пиролиза малых углеводородов на поверхностях ПМ. При этом может применяться как температурно-программируемый рост (ТПР), так и химическое осаждение из газовой фазы (ХОГФ). В работе [6] слои графена были получены путем высокотемпературного отжига монокристалла Ru(0001), что приводило к сегрегации растворенного в объеме углерода на поверхность с образованием эпитаксиально ровного монослоя графена. В то время как первый графеновый слой сильно взаимодействует с металлической подложкой, второй слой лежит на первом и демонстрирует слабую электронную связь с металлом и, следовательно, сохраняет присущую графену электронную структуру. В работах [7, 8] показано образование одного слоя графена на Rh(111) при воздействии на подложку этилена при температуре 1100 К (2×10⁷ мбар, 3 мин). О росте полупроводникового графена на палладии при осаждении на его поверхность этилена при температурах от 723 до 1023 К сообщается в работе [9]. Авторы [10] с помощью сканирующей туннельной микроскопии наблюдали однослойный графен с высоким качеством структуры на поверхности Ir(111), выращенный методом химического осаждения из газовой фазы при низком давлении. Поведение роста слоев углерода, сформированных на поверхности Pt(111), было исследовано с помощью сканирующей туннельной микроскопии [11]. Углеродный слой со структурой (√19 × √19)R23.4° был

* E-mail: dma@spmlab.ru

выращен путем экспозиции 3 Ленгмюр (Л) бензола при температуре 1000 К ($1 \text{ Л} = 10^{-6} \text{ Торр} \times \text{с}$). После экспозиции, превосходящей 10 Л, на terraces поверхности наблюдались графеновые островки гексагональной формы. Первые непосредственно наблюдаемые ОУНТ [12, 13] были сформированы с использованием метода дугового разряда, возникающего между углеродными электродами. Этот процесс тесно связан с методом дугового разряда Кречмера–Хаффмана, первоначально разработанным для синтеза фуллеренов [14]. Бетюн и др. [13] наблюдали множественные ОУНТ при попытке синтеза эндоздральных металлофуллеренов. В дальнейшем описанные выше методы были заменены каталитическим ХОГФ, которое в настоящее время, несомненно, является наиболее широко используемым методом синтеза ОУНТ, облегчающим производство их в промышленных масштабах. Метод ХОГФ получил широкое распространение для выращивания УНТ в 1993 г. [15]. Однако он использовался для осаждения углеродных пленок с 1950-х годов [16] и был упомянут при идентификации первых УНТ в 1952 г. [17]. В зависимости от силы взаимодействия с металлическим катализатором разные формы углерода (карбидные или графитовые по своей природе) могут быть как полезными, так и вредными (так при синтезе графена на поверхности металла полезными будут графитовые формы углерода, а вредными — карбидные), играя активную роль в химическом превращении или приводя к потере активности катализатора с течением времени [18]. Процесс деградации катализатора имеет как химическую, так и физическую природу и происходит одновременно с основной реакцией. Дезактивация неизбежна, но ее можно замедлить или предотвратить, а некоторых ее последствий можно избежать. В частности, было показано, что галогены связывают как радикалы водорода, так и аморфный углерод, которые в противном случае образовывали бы sp^3 -гибридизованный углерод, препятствуя росту углеродных нанотрубок. С этой целью в качестве первоначального соединения в настоящей работе был выбран фторфуллерен, молекулы которого, будучи адсорбированными на поверхности Pt(111), начинают разлагаться уже при комнатной температуре, насыщая катализатор фтором и обеспечивая рост УНТ и графена при последовательном повышении температуры.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОЦЕДУРА

Измерения методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) проводились на установке Omicron Nanotechnology при комнатной температуре. Для сканирования использовались зонды, приготовленные из поликристаллической вольфрамовой проволоки методом электрохимического травления. Для удаления оксидного слоя с кончика СТМ-игл их отжигали при температуре 1200°C в условиях сверхвысокого вакуума

(1.0×10^{-10} Торр). Все приведенные в работе СТМ-изображения были получены в режиме постоянного тока. Туннельное напряжение прикладывалось к образцу, а зонд СТМ был виртуально заземлен. Обработка изображений проводилась с помощью программы Nanotec WSxM [19]. В качестве образца использовался монокристалл Pt(111), для очистки поверхности которого в условиях сверхвысокого вакуума проводилась серия повторных циклов ионной (Ar^+) бомбардировки при 1 кэВ в течение 5 мин и термического отжига при температуре 600°C в течение 10 мин. В процессе отжига давление в вакуумной системе оставалось в пределах 10^{-10} торр. Нанесение на приготовленную таким образом поверхность Pt(111) молекул фторфуллерена $\text{C}_{60}\text{F}_{48}$ производилось из ячейки Кнудсена со скоростью 0.03 МС/мин. В настоящей работе 1 МС (монослой) определялся как количество молекул, образующих плотноупакованный слой фторфуллерена на поверхности Pt(111).

2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения экспериментов степень покрытия поверхности Pt(111) молекулами $\text{C}_{60}\text{F}_{48}$ была выбрана в диапазоне 0.3–0.5 МС, на основе анализа литературы [20] и ранее проведенных нами исследований по изучению адсорбции молекул фторфуллеренов с разной стехиометрической конфигурацией [21]. Было установлено, что увеличение количества атомов фтора на углеродном остове молекулы упрощает ее распад (отщепление атомов фтора от углеродного остова). Наши исследования [21, 22] однозначно свидетельствуют, что молекулы фторфуллерена на поверхности металлов на СТМ-изображениях выглядят выше, чем молекулы C_{60} .

Непосредственно после адсорбции молекул фторфуллерена на поверхность Pt(111) наблюдалось образование новой структуры, индуцированной отщепленными от углеродного остова атомами фтора. Характерное СТМ-изображение представлено на рис. 1, а. Высота молекул на СТМ-изображениях оценивалась с использованием построения профиля поверхности над выбранным участком, содержащим чистую поверхность Pt(111), фтор-индуцированную структуру и островки, содержащие молекулы фторфуллерена (рис. 1, б). Произведенные оценки дают значение $8.2 \pm 0.3 \text{ \AA}$, что существенно отличается от значений $5.3 \text{ \AA}$ [23] и $6.6 \text{ \AA}$ [24] для молекул C_{60} , адсорбированных на поверхности Pt(111). С течением времени площадь поверхности, занятая F-индуцированной структурой, увеличивается в размерах, что наглядно видно на СТМ-изображениях, представленных на рис. 2, а, б.

Оба СТМ-изображения показывают один и тот же участок поверхности, но изображение на рис. 2, б получено на 10 ч позднее. Два участка нуклеации новой фторсодержащей структуры отчетливо видны в нижней части СТМ-изображений,

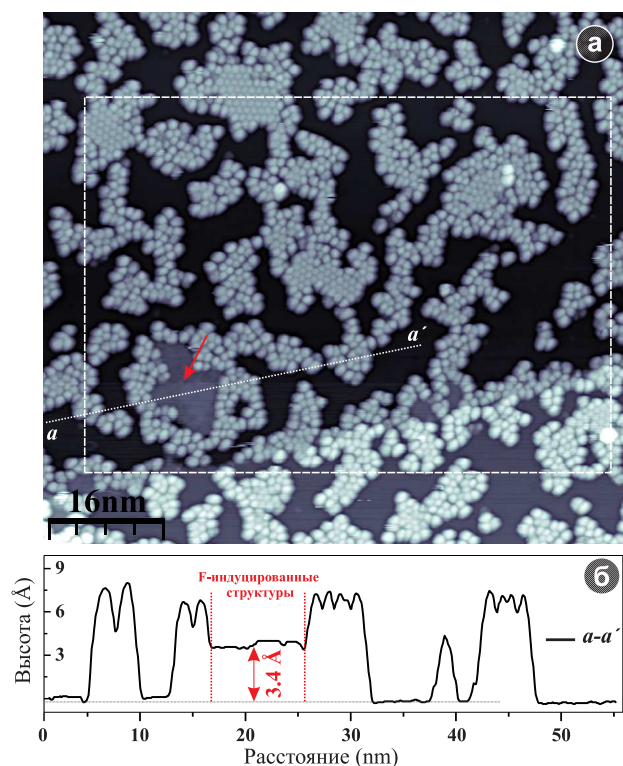


Рис. 1. *a* — СТМ-изображение ($U_t = -1.8$ В; $I_t = 17$ пА) поверхности Pt(111) после адсорбции молекул $C_{60}F_{48}$, через 40 часов с момента нанесения; *б* — профиль поверхности вдоль пунктирной линии *aa'*, изображенной на *a*. Стрелка на рисунке показывает зарождение F-индуцированной структуры, возникающей на поверхности Pt(111) в результате отщепления атомов F от углеродного остова молекулы $C_{60}F_{48}$

а стрелки указывают направление роста структуры. С течением времени и увеличением площади F-индуцированной структуры одновременно уменьшается высота части молекул фторфуллеренов. Через пять суток непрерывного наблюдения высота части молекул составляла уже 7.0 ± 0.2 Å, но тем не менее оставалась больше высоты молекул C_{60} на Pt(111) [23] при отсутствии термического отжига. В данном случае уместно говорить о стехиометрии молекул вида $C_{60}F_{48-n}$, где n — целое число. Согласно [25] адсорбция атомарного фтора на Pt(111) изучалась методами термодесорбционной масс-спектрологии и дифракции медленных электронов; основным продуктом десорбции, помимо фтора, являлся PtF_2 . Далее, образец Pt(111) с адсорбированными на поверхности молекулами $C_{60}F_{48}$ подвергался термическому отжигу при 520°C (рис. 3, *a*), в результате чего наблюдались два вида молекул C_{60} , высота которых находится в хорошем согласии с данными [24], где полученные значения 7.5 ± 0.3 Å и 4.8 ± 0.5 Å соответствуют ярким и тусклым молекулам C_{60} на поверхности Pt(111) после отжига до 442°C . Помимо островков, содержащих молекулы C_{60} , отчетливо видны сформированные на поверхности Pt(111) углеродные нанотрубки и начальная нуклеация графена

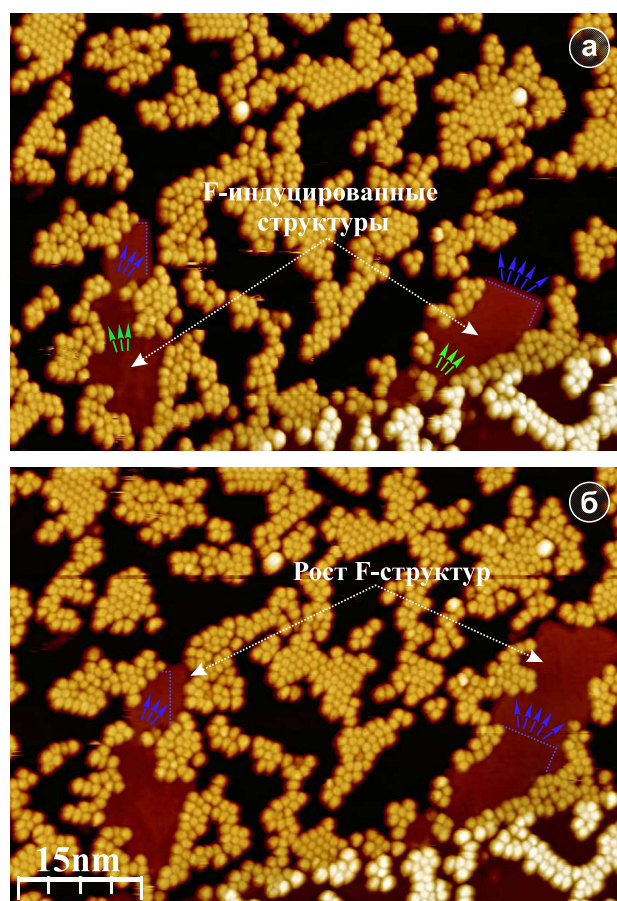


Рис. 2. СТМ-изображения ($U_t = -1.8$ В; $I_t = 17$ пА) поверхности Pt(111) после адсорбции молекул $C_{60}F_{48}$, через 50 ч (*a*) и через 60 ч (*б*) с момента нанесения. Стрелками на рисунках показаны F-индуцированные структуры и направление их роста

(рис. 3, *a, б*). Синтезированные таким путем УНТ можно заметить на трех различных террасах на СТМ-изображении, представленном на рис. 3, *a*. Отчетливо видно, что УНТ сохраняет свою непрерывность при переходе через моноатомную ступеньку Pt(111). Участки поверхности, на которых видна начальная нуклеация графена (см. маркировку γ -G на рис. 3, *a, б*), ориентированы строго в направлении роста УНТ. Отсюда можно сделать вывод, что при указанной температуре термического отжига уже происходит процесс частичного распада УНТ и начинается процесс зарождения графена. Рис. 3, *б* показывает увеличенное изображение области разрыва УНТ на поверхности Pt(111). Молекулы фуллерена C_{60} все еще возможно наблюдать на поверхности образца, наряду с синтезом УНТ и зарождением графена. На рис. 4, *a* приведено СТМ-разрешение высокого разрешения молекул C_{60} на поверхности Pt(111). Пользуясь данными [23], можно заключить, что три пятиугольных кольца (три пентагона) расположены в верхней части адсорбированной молекулы (рис. 4, *б*), дают основной вклад в электронную плотность состояний, наблюдаемую в приведённом СТМ-изображении. Авто-

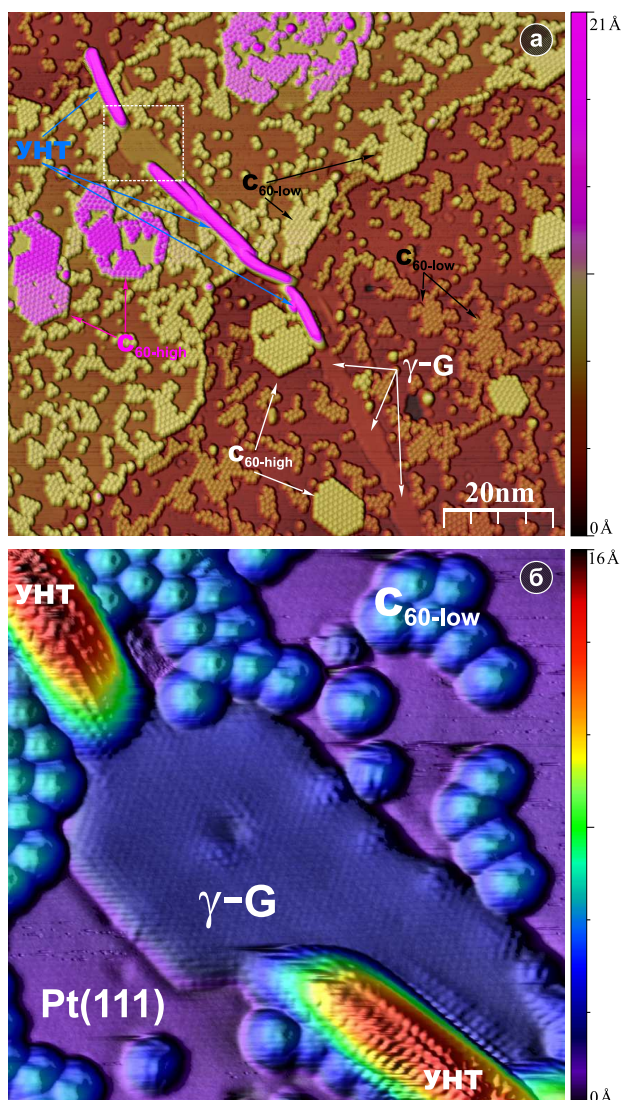


Рис. 3. СТМ-изображения ($a - U_t = +2.1$ В; $I_t = 18$ пА, $b - U_t = +0.2$ В; $I_t = 100$ пА) поверхности Pt(111) с нанесенными на нее молекулами фторфуллерепа после отжига до 520°C . a — Отчетливо наблюдаются яркие $\text{C}_{60\text{-high}}$ и тусклые $\text{C}_{60\text{-low}}$ изображения молекулы фуллерепа, УНТ и графен в модификации $\gamma\text{-G}$ (см. ниже в тексте); b — детальное СТМ-изображение области (см. прямоугольник на (a)), содержащей УНТ и $\gamma\text{-G}$. Для большей наглядности СТМ-изображения (a , b) представлены в трёхмерном виде с боковой подсветкой

ры работы [26], исследуя дефрагментацию молекул C_{60} на поверхности Pt(111) с помощью ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии, дифракции медленных электронов и обратной фотоэмиссионной спектроскопии, показали, что продукты фрагментации C_{60} состоят из углеродного слоя, содержащего от трех до шести гексагонов. Согласно [27, 28], рост ОУНТ инициируется образованием прекурсора углерода, обычно называемого «шапочкой». Зародышеобразование УНТ является термодинамически благоприятным процессом, вызывая существование УНТ на промежуточных стадиях

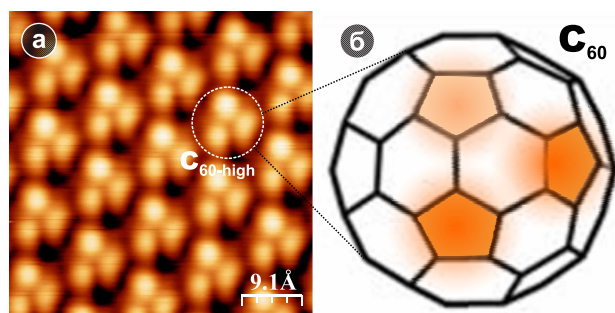


Рис. 4. a — СТМ-изображение высокого разрешения ($U_t = 2.2$ В; $I_t = 73$ пА) молекул C_{60} на поверхности Pt(111) после отжига при температуре 520°C . СТМ-изображение одиночной молекулы (выделена окружностью) в виде трёхлистника соответствует изображению, полученному в [23]; b — ориентация молекулы C_{60} , отвечающая за СТМ-изображение, представлена на a

термического отжига, и в итоге приводит к подъему образованного углеродного фрагмента от поверхности катализатора. Продолжающееся добавление углерода на границе раздела УНТ/поверхность катализатора приводит к формированию углеродного кольца, вызывая удлинение стенок УНТ. Возникновение УНТ никогда прежде не наблюдалось при распаде молекул C_{60} на поверхности Pt(111) и вызвано, по всей видимости, фторированием платины вследствие высокотемпературного пиролиза молекулы $\text{C}_{60}\text{F}_{48}$, в результате чего происходит связывание аморфного углерода [28]. Дальнейшее увеличение температуры отжига образца до 620°C способствует формированию на поверхности Pt(111) островковых однослойных графеновых доменов с различной суперструктурой (рис. 5). Графеновые суперструктуры зачастую формируют на Pt(111) муаровые картины (см. рис. 5, b - c), которые характеризуются углом между рядами графена и кристаллографическим направлением $[110]$ поверхности Pt(111). Модель, предсказывающая образование 22 стабильных суперструктур на Pt(111), была предложена в работе [29], из которых экспериментально было найдено 19. Измеренный угол (16.5°) между направлением муаровых выпуклостей на СТМ-изображении и направлением атомных рядов Pt (см. рис. 5, b), а также периодичность структуры (2.1 нм) находятся в хорошем соответствии с результатами работы [30], где использовался метод молекулярно-лучевой эпитаксии для синтеза графена на благородных металлах. СТМ-изображение на рис. 5, b показывает муаровую структуру (в верхней части кадра) с периодом, равным 1.5 нм, и хорошо известную реконструкцию графена на $\text{G}/\text{Pt}(111)(\sqrt{3} \times \sqrt{3})\text{R}30^\circ$ [29]. На рис. 5, c приведено СТМ-изображение, где отчетливо видна муаровая структура графена на поверхности Pt(111) и одновременно атомное разрешение поверхности Pt(111)(1×1). Обозначения $\xi\text{-G}$ и $\gamma\text{-G}$, приведенные на рис. 5, a , были введены в работе [30] и характеризуют периодичность наблюдаемых структур графена, равную 21.7 ± 0.3 Å и 10.2 ± 0.3 Å соответственно.

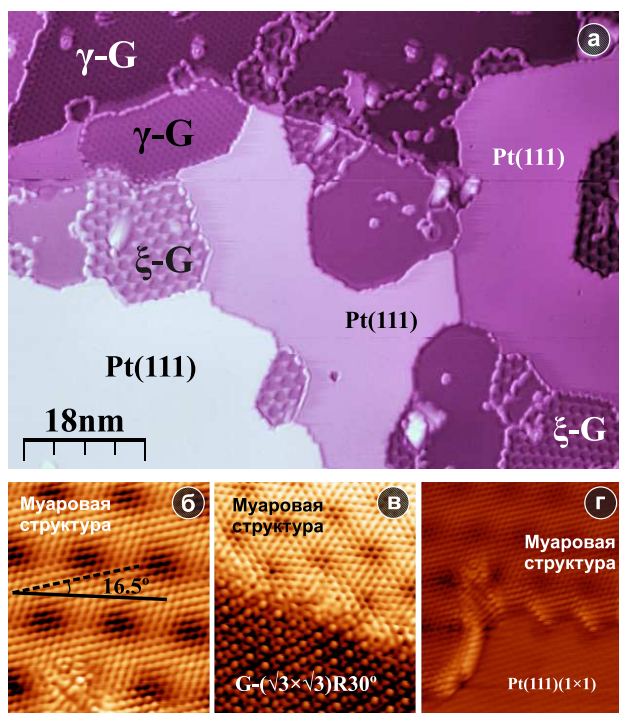


Рис. 5. (а) СТМ-изображение ($U_t = 2.2$ В; $I_t = 73$ пА) поверхности $C_{60}/Pt(111)$ после отжига при температуре 620°C , демонстрирующее зарождение различных поверхностных фаз графена; б–г — СТМ-изображения высокого разрешения (б — $U_t = 3$ мВ; $I_t = 35$ нА; в — $U_t = 52$ мВ; $I_t = 8$ нА; г — $U_t = 1.2$ В; $I_t = 25$ пА) монослойного графена на поверхности $Pt(111)$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования продемонстрирован контролируемый рост УНТ и графенового покрытия на поверхности $Pt(111)$ вследствие адсорбции и дальнейшего распада молекул фторфуллеренов. Было показано, что $C_{60}F_{48}$ является активным источником фтора на поверхности платинового катализатора даже при комнатной температуре. Высокотемпературный пиролиз способствует фторированию поверхности платины и связыванию аморфного углерода, вызывая существование УНТ на промежуточных стадиях термического отжига, что никогда прежде не наблюдалось при распаде молекул C_{60} на поверхности $Pt(111)$. Повышение температуры до 620°C позволило наблюдать субмонослойное покрытие поверхности $Pt(111)$ графеном, содержащим домены с хорошо известными поверхностными структурами.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова.

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

- [1] Saito R., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S. Physical Properties of Carbon Nanotubes. 1998. London: Imperial College Press.
- [2] Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. et al. // *Nature*. **438**, N 7065, 197 (2005).
- [3] Bunch J.S., Van Der Zande A.M., Verbridge S.S. et al. // *Science*. **315**, N 5811, 490 (2007).
- [4] Balandin A.A., Ghosh S., Bao W. et al. // *Nano Lett.* **8**, N 3, 902 (2008).
- [5] Avouris P. // *Nano Lett.* **10**, N 11, 4285 (2010).
- [6] Marchini S., Günther S., Wintterlin J. // *J. Phys. Rev. B*. **76**, N 7, 075429 (2007).
- [7] Sutter P.W., Flege J.I., Sutter E.A. // *Nature materials*. **7**, N 5, 406 (2008).
- [8] Wang B., Caffio M., Bromley C. et al. // *ACS Nano*. **4**, N 10, 5773 (2010).
- [9] Kwon S.Y., Ciobanu C.V., Petrova V. et al. // *Nano Lett.* **9**, N 12, 3985 (2009).
- [10] Coraux J.N., Diaye, A.T., Busse C. et al. // *Nano Lett.* **8**, N 2, 565 (2008).
- [11] Fujita T., Kobayashi W., Oshima C. // *An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films*. **37**, N 2, 120 (2005).
- [12] Iijima S., Ichihashi T. // *Nature*. **363**, N 6430, 603 (1993).
- [13] Bethune D.S., Kiang C.H., De Vries M.S. et al. // *Nature*. **363**, N 6430, 605 (1993).
- [14] Howard J.B., McKinnon J.T., Makarovskiy Y. et al. // *Nature*. **352**, N 6331, 139 (1991).
- [15] José-Yacamán M., Miki-Yoshida M., Rendón L., Santiesteban J. G. // *Appl. Phys. Lett.* **62**, N 2, 202 (1993).
- [16] Walker Jr.P.L., Rakaszowski J.F., Imperial G.R. // *The J. of Phys. Chem.* **63**, N 2, 133 (1959).
- [17] Radushkevich L.V., Lukyanovich V.Á. // *J. Phys. Chem.* **26**, 88 (1952).
- [18] Forzatti P., Lietti L. // *Catalysis today*. **52**, N 2-3, 165 (1999).
- [19] Horcas I., Fernández R., Gomez-Rodriguez J.M. et al. // *Rev. of Sci. Instr.* **78**, N 1 (2007).
- [20] Van Lier G., Cases M., Ewels C.P. et al. // *The J. Org. Chem.* **70**, N 5, 1565 (2005).
- [21] Орешкин С.И., Петухов М.Н., Музыченко Д.А. и др. // *Письма в ЖЭТФ*. **119**, N 3, 212 (2024).
- [22] Oreshkin A., Muzychenko D., Oreshkin S. et al. // *Nano Research*. **11**, 2069 (2018).
- [23] Liu C., Qin Z., Chen J. et al. // *The J. of Chem. Phys.* **134**, 044707 (2011).
- [24] Pinardi A.L., Biddau G., van De Ruit K., Otero-Irurueta G. et al. // *Nanotechnology*. **25**, N 38, 385602 (2014).
- [25] Bechtold E. // *Applications of Surface Science*. **7**, N 3, 231 (1981).
- [26] Pedio M., Hevesi K., Zema N. et al. // *Surface science*. **437**, N 1-2, 249 (1999).
- [27] Dai H., Rinzler A.G., Nikolaev P. et al. // *Chem. Phys. Lett.* **260**, N 3-4, 471 (1996).

- [28] Page A.J., Ding F., Irle S. et al. // *Reports on Progress in Physics*. **78**, N 3. 036501 (2015).
 [29] Merino P., Svec M., Pinardi A.L. et al. // *Acs Nano*. **5**, N 7. 5627 (2011).
 [30] Hernández-Rodríguez I., Garsia J.M., Martín-Gago J.A. et al. // *Diamond and Related Materials*. **57**. 58 (2015).

Employment of fluorofullerene molecules for controlled growth of carbon nanotubes and highly ordered graphene on Pt(111) surface

D.A. Muzychenko^{1,a}, S.I. Oreshkin², V.O. Surov¹, A.V. Samorodskiy¹, M.Yu. Alexandrov¹,
 V.I. Panov¹, A.I. Oreshkin^{1,b}

¹Department of Quantum Electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

²Sternberg Astronomical Institute. Moscow 119234, Russia

E-mail: ^adma@spmlab.ru, ^boreshkin@physics.msu.ru

Аннотация The possibility of using fluorofullerene C₆₀F₄₈ for controlled growth of carbon nanotubes and domains of highly ordered graphene stimulated by intermediate fluorination of the platinum catalyst surface is demonstrated. The C₆₀F₄₈ molecule was chosen to ensure easy cleavage of fluorine atoms from the carbon framework on the Pt(111) surface. It is shown that fluorofullerene molecules decay on the Pt(111) surface, losing fluorine atoms already at room temperature. High-temperature pyrolysis promotes fluorination of the Pt(111) surface and binding of amorphous carbon, causing sequential growth of carbon nanotubes and graphene with increasing temperature.

PACS: 68.37.E, 61.46.-w, 68.65.Pq.

Keywords: fluorofullerenes, carbon nanotubes, graphene.

Received 27 January 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

- Музыченко Дмитрий Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: dma@spmlab.ru.
- Орешкин Сергей Иванович — науч. сотрудник; e-mail: sioresh@yahoo.com. LI
- Суров Владислав Олегович — студент; e-mail: surov.vo20@physics.msu.ru.
- Самородский Андрей Владиславович — аспирант; e-mail: and.legkov@yandex.ru.
- Александров Михаил Юрьевич — студент; e-mail: misha.alexandrov2014@yandex.ru.
- Панов Владимир Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; e-mail: panov@spmlab.phys.msu.ru.
- Орешкин Андрей Иванович — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: oreshkin@physics.msu.ru .