

Локальные химические реакции с участием атомов фтора на поверхности Pt(111)

Д.А. Музыченко,¹ С.И. Орешкин,² М.Н. Петухов,³ М.А. Ардамин,¹
М.Ю. Александров,¹ В.И. Панов,¹ А.И. Орешкин^{1,*}

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

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

³Междисциплинарная лаборатория Карно, Университет Бургундии, 21078 Дижон, Франция
(Поступила в редакцию 02.01.2026; после доработки 02.02.2026; подписана в печать 12.02.2026)

Адсорбция атомов фтора на поверхности Pt(111) была изучена с помощью методов сверхвысоковакуумной сканирующей туннельной микроскопии (СВВ СТМ) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). В качестве источников фтора были выбраны молекулы фторфуллерена, при нанесении которых на Pt(111) происходит отщепление атомов фтора от углеродного остова и формирование новых поверхностных структур. Вариация стехиометрического состава, так же, как и количество осажденных молекул фторфуллерена, позволяет получать различную концентрацию атомов фтора на исследуемой поверхности. При использовании молекул C₆₀F₁₈ было обнаружено возникновение поверхностной фтор-индуцированной структуры. Наблюдаемая структура не была стабильной и полностью исчезала в течение около 3–4 суток непрерывного мониторинга с помощью СТМ. Осаждение молекул C₆₀F₄₈ на Pt(111) также приводило к возникновению на поверхности неустойчивых структур. Спектры, полученные с помощью метода РФЭС, наглядно продемонстрировали отсутствие химического взаимодействия между платиной и фтором. Наличие водорода на поверхности платины и его взаимодействие с фтором с образованием летучего фтороводорода позволяет объяснить исчезновение наблюдаемых структур с течением времени.

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

Ключевые слова: фторфуллерены, локальные химические реакции, сверхструктуры.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.81.2620502

ВВЕДЕНИЕ

В период с 1979 по 1987 гг. наблюдался повышенный интерес к исследованиям хемосорбции галогенов на поверхностях металлов, полупроводников и изоляторов. За это время было опубликовано столько же работ, сколько и за весь предшествующий период. Результаты исследований наиболее полно представлены в [1]. Особенно подробно рассматриваются поверхностные структуры, образуемые адсорбированными галогенами, и их взаимопревращения, обусловленные изменениями в покрытии поверхности. Более свежая подборка результатов по адсорбции галогенов на поверхности металлов представлена в обзоре [2]. Помимо интересных задач в области фундаментальной физики, галогенирование поверхности металлов вызывает значительный интерес в прикладных задачах физики, материаловедения и микроэлектроники [3, 4]. Фтор среди представленных на сегодняшний день исследований по адсорбции галогенов изучен недостаточно полно. Это, по всей видимости, связано

с проблемами создания хорошо контролируемого источника фтора, который к тому же весьма токсичен и оказывает негативное действие на вакуумную аппаратуру и средства измерения. Почти во всех исследованиях фтор наносился на поверхность косвенным методом. Наиболее широко распространенным из них является использование XeF₂ [5, 6], который является твердым при комнатной температуре (температура плавления ~402 К). Хотя фторид ксенона по-прежнему остаётся коррозионным, но все же он является менее едким, чем фтор, что делает его применение обоснованным. Обе работы посвящены воздействию фтора посредством диссоциативной хемосорбции XeF₂ на поверхностях Si(111)–(2×1), Si(100)–(2×1), Si(111)–(7×7). Методом фотоэмиссионной спектроскопии высокого разрешения при монослойном покрытии фтором было выявлено существование SiF₁, SiF₂ и SiF₃. Доказательств наличия непрореагировавшего исходного фтора обнаружено не было. В работе [7] фторирование поверхностей поликристаллических ванадия, железа и меди проводилось путем напуска в вакуумную систему газа XeF₂. С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии было установлено, что пленки VF₃, FeF₂, CuF₂ образуются на соответствующих подложках. Одним

* E-mail: oreshkinai@my.msu.ru

из недостатков этого метода является очень высокая концентрация атомов фтора (минимальная экспозиция по XeF_2 в приведенной работе составила 20 Л). Кроме того, воздействие на поверхность высокореакционноспособных газов, таких как XeF_2 , требует специальных процедур, разработанных для предотвращения загрязнения образца газами, выделяющимися в ходе обменных реакций на стенках вакуумной камеры.

В работе [8] показано, как фтор может быть получен в вакууме путем твердофазного электролиза фторида кальция. Устройство представляло собой кристалл фторида кальция с платиновым диском в качестве катода и платиновой сеткой в качестве анода, вся конструкция удерживалась вместе стальными пружинами. При пропускании постоянного тока (около 50 мкА) через ячейку ионы фтора мигрируют к аноду, где образуется элементарный фтор, в то время как металлический кальций осаждается на катоде. Фторид кальция был выбран из возможных ионных проводников из-за его стабильности при вакуумной обработке и низкого давления паров. Ячейка работала при температуре от 420 до 450 К для увеличения ионной подвижности. (В ячейке также успешно использовались никелевые электроды.) Хорошо коллимированный пучок F_2 формировался с давлением паров в пучке до 5×10^{-7} мбар, с небольшими уровнями загрязнения HF , фторидами платины и тетрафторидом кремния из-за реакции с различными компонентами ячейки. Адсорбция элементарного фтора на $\text{Pt}(111)$ была изучена методами термодесорбционной масс-спектрографии и дифракции медленных электронов (ДМЭ). Показано, что при комнатной температуре фтор адсорбируется с высокой вероятностью прилипания, которая остается постоянной вплоть до высокой степени покрытия. Анализ с помощью ДМЭ выявил упорядочение адсорбированного слоя вдоль рядов в направлениях $\langle 10 \rangle$ с расстоянием между рядами, равным удвоенному периоду подложки. Изучение спектров термодесорбции указывает на образование атомов фтора и небольшого количества PtF_2 в случае малых экспозиций. Оценки энергии десорбции дали значение, равное 220 кДж/моль. При более высоких экспозициях наблюдалось образование верхнего слоя без заметного порядка, а спектры термодесорбции свидетельствовали об образовании более тяжелых фторидов платины (в основном PtF_4).

В работе [9] показана возможность фторирования платины с использованием поверхностной диффузии адсорбированных атомов фтора. Изменяя направление и величину диффузионного потока, можно управлять концентрацией атомов фтора. Полученные данные свидетельствуют о существовании адсорбированных атомов фтора с различной окислительной способностью. Авторами [10] проведено исследование системы платина–фтор при различных температурах, и был выделен новый фторид $\text{Pt}^{II}\text{Pt}^{IV}\text{F}_6$, который является первым примером платины со степенью окисления (+II) в окруже-

нии фтора в октаэдрическом окружении. В этой же работе было показано, что при температуре ниже 100°C фторидов платины не образуется. Адсорбция фторуглеродов является еще одним способом введения фтора на поверхность, но данный метод хорошо применим только для исследования субмонослойных покрытий. В качестве наиболее часто используемого реагента можно отметить молекулы фторфуллеренов [11–16].

Другой косвенный метод заключается в использовании ионов фтора [17]. Измерения времени жизни адсорбции проводились с использованием метода импульсного ионного пучка, описанного в статье [18]. Импульсный пучок положительных ионов X^+ ($\text{X} = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}$) фокусировался на поверхностях (100) и (111) монокристалла Мо. Энергия ионного пучка могла регулироваться в диапазоне 200–2500 эВ. Кинетика десорбции регистрировалась путём отбора сигнала, соответствующего термическим отрицательным ионам, в период «выключения» пучка положительных ионов. В работе [18] отмечено, что эта кинетика подобна кинетике истощения галогена на поверхности. Поскольку время жизни галогена в диапазоне температур (1700–2400 К) не превышало 1 с, а поток положительных ионов $< 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, обеспечивалась низкая степень покрытия поверхности ($\Theta < 10^{-2}$ монослоя (МС)). Исследование показало, что энергия связи уменьшается от F к Br и энергия связи слабо меняется от ориентации (плоскость (111) или (100) выбрана). Ввиду того обстоятельства, что в нашем исследовании планировалось использовать субмонослойные покрытия поверхности $\text{Pt}(111)$, в качестве источника фтора были выбраны молекулы фторфуллеренов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОЦЕДУРА

Измерения РФЭС и СТМ проводились с использованием различных вакуумных систем, но при схожих экспериментальных условиях. Все СТМ-измерения проводились в сверхвысоком вакууме (с базовым давлением в системе 4×10^{-11} Торр) на установке СТМ (Omicron Nanotechnology) при комнатной температуре с использованием зондов, изготовленных из проволоки вольфрама методом электрохимического травления. Все представленные в работе СТМ-изображения были получены в режиме постоянного тока. Во всех проведенных экспериментах туннельное напряжение U_t прикладывалось к образцу, а зонд СТМ был виртуально заземлен. Обработка изображений проводилась с помощью программы Nanotec WSxM [19]. Монокристалл $\text{Pt}(111)$ был эпитаксиально выращен на подложке сапфира и очищен в условиях СВВ повторными циклами ионной (Ar^+) бомбардировки при 1 кэВ и отжига при 823 К в течение 2–3 часов. Молекулы $\text{C}_{60}\text{F}_{18}$ осаждались из ячейки Кнудсена на чистую поверхность $\text{Pt}(111)$ при комнатной температуре при скорости напыления 0.03 МС/мин. Один МС определя-

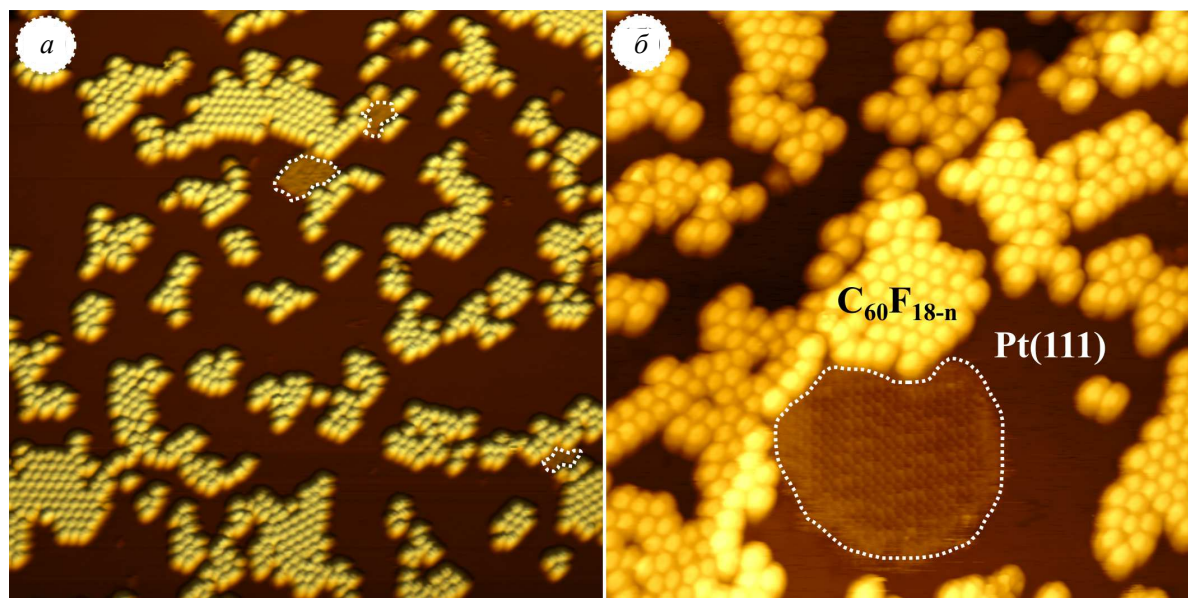


Рис. 1. *a* — СТМ-изображение ($63.4 \text{ нм} \times 63.4 \text{ нм} \times 1.1 \text{ нм}$; $U_t = -1.8 \text{ В}$; $I_t = 17 \text{ пА}$) поверхности Pt(111) после адсорбции молекул $\text{C}_{60}\text{F}_{18}$, через 26 ч с момента нанесения; *б* — СТМ-изображение ($33.6 \text{ нм} \times 33.6 \text{ нм} \times 1.3 \text{ нм}$; $U_t = -1.5 \text{ В}$, $I_t = 25 \text{ пА}$) поверхности Pt(111) после адсорбции молекул $\text{C}_{60}\text{F}_{18}$, через 99 ч с момента нанесения. Пунктирной линией выделены места зарождения фтор-индуцированной структуры, возникающей на поверхности Pt(111) в результате отщепления атомов F от углеродного остова молекулы $\text{C}_{60}\text{F}_{18}$

ется как количество молекул, образующих плотноупакованный слой фторфуллере на поверхности Pt(111). Эксперимент РФЭС проводился в сверхвысоковакуумной камере с базовым давлением 1×10^{-10} Торр, оснащенной полусферическим анализатором Omicron EA 125 и источником рентгеновского излучения XR705 VG Microtech с двойным анодом. В измерениях методом РФЭС использовалась линия мягкого характеристического рентгеновского излучения Al K_{α} . В РФЭС-измерениях угол выхода электронов, попадающих в анализатор, был равен 60° , 80° и 0° относительно нормали к поверхности. В виду того, что интенсивность сигнала оказалась не зависимой от угла, все спектры, приведенные в работе, представлены для угла, равного 60° . Шкала энергии РФЭС была откалибрована по положению пика Pt $4f_{7/2}$ (71.2 эВ). Для обработки спектров РФЭС использовалось программное обеспечение CasaXPS [20].

2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После нанесения на поверхность Pt(111) молекул $\text{C}_{60}\text{F}_{18}$ со степенью покрытия, равной 0.4 монослоя, анализируя СТМ-изображение (рис. 1), можно заметить формирование новых поверхностных структур, вызванных отщеплением атомов фтора от молекул фторфуллере на. Места зарождения таких структур обозначены пунктирной линией. Следует отметить, что площадь, занятая новыми структурами, составляет всего 0.05–0.15 МС.

По-видимому, этот факт вызван малой концен-

трацией отщепленных от углеродного остова атомов фтора. Наблюдаемые в эксперименте фтор-индуцированные структуры нестабильны и имеют тенденцию к трансформации во время сканирования. С целью увеличения концентрации атомов фтора на поверхности платины была проведена дополнительная серия измерений с использованием в качестве источника фтора молекулы фторфуллере на $\text{C}_{60}\text{F}_{48}$. Из данных работы [21] можно заключить, что энергия связи атомов фтора с углеродным остовом понижается с увеличением их числа. Вычисленные значения энергии связи атома фтора для молекулы $\text{C}_{60}\text{F}_{18}$ равны 2.15 эВ/атом или 2.8 эВ/атом, в зависимости от того, каким измерением — «S» или «T» — она представлена. Для молекулы $\text{C}_{60}\text{F}_{48}$ были получены значения 1.5 эВ/атом и 1.1 эВ/атом. Исходя из приведенных результатов, осаждение фторфуллере на $\text{C}_{60}\text{F}_{48}$ для получения атомов фтора выглядит более предпочтительным. На рис. 2 показано формирование фтор-индуцированной структуры на поверхности Pt(111) с течением времени.

Молекулы $\text{C}_{60}\text{F}_{48}$ начинают терять атомы фтора непосредственно после напыления на поверхность Pt(111). Рис. 2, *a* показывает СТМ-изображение системы $\text{C}_{60}\text{F}_{48}$ -Pt(111), полученное через 15 ч после нанесения фторфуллере на. В нижней части кадра видно формирование области со слабо упорядоченной фтор-индуцированной структурой. Возникновение таких областей на поверхности Pt(111) характерно сразу после напыления молекул $\text{C}_{60}\text{F}_{48}$. С течением времени внутри таких областей происходит упорядочение структуры. Рис. 2, *б* показывает СТМ-изображение, полученное через 96 ч после на-

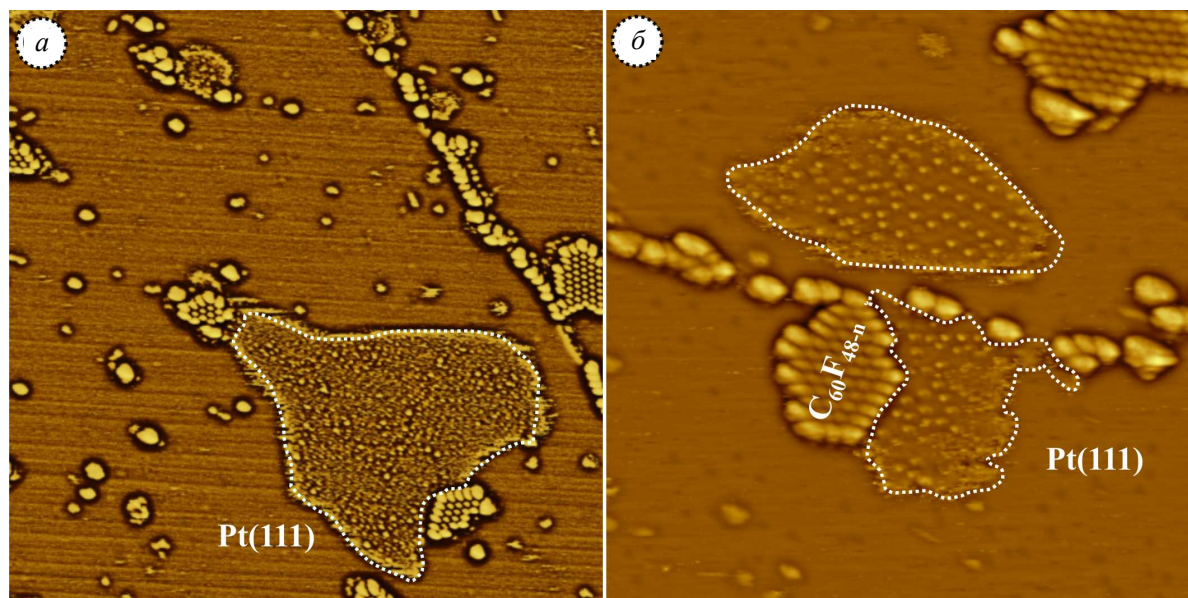


Рис. 2. Формирование фтор-индуцированной структуры на поверхности Pt(111) с течением времени. *a* — СТМ-изображение (78.7 нм×78.7 нм×1.3 нм: $U_t = -2.0$ В, $I_t = 22$ пА) получено через 15 ч после нанесения молекул фторфуллерена $C_{60}F_{48}$ на поверхность Pt(111); *б* — СТМ-изображение (43.8 нм×43.8 нм×1.1 нм: $U_t = -1.8$ В, $I_t = 16$ пА) получено через 96 ч после нанесения молекул фторфуллерена $C_{60}F_{48}$ на поверхность Pt(111). Области, содержащие фтор-индуцированную структуру, отмечены пунктирной линией

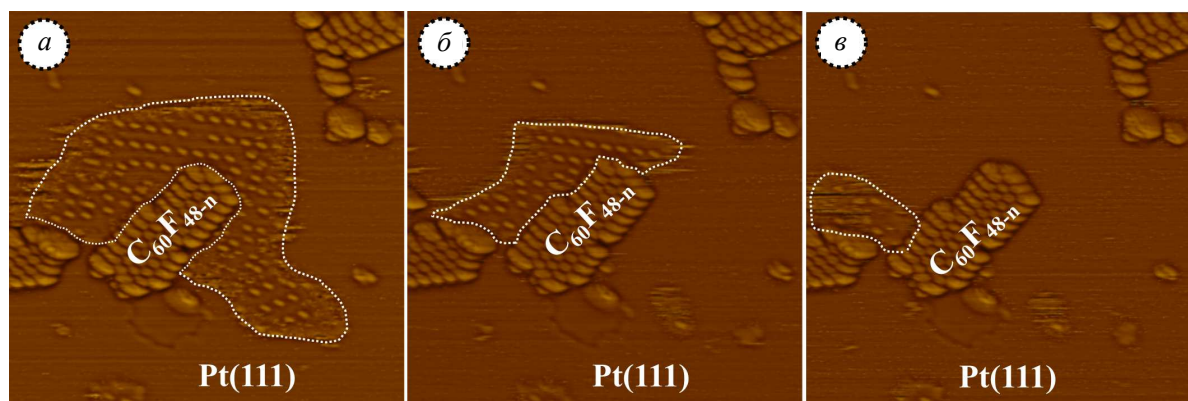


Рис. 3. Трансформация фтор-индуцированной структуры на поверхности Pt(111) в режиме реального времени. На СТМ-изображениях (35.7 нм × 35.7 нм × 1.1 нм: $U_t = -1.5$ В, $I_t = 16$ пА), обозначенных как (*a*), (*б*), (*в*), показаны три последовательных кадра поверхности. Время сканирования каждого кадра равнялось 30 мин. Пунктирной линией отмечена область, содержащая фтор-индуцированную структуру

пыления. Образованная раньше хаотическая структура переходит в структуру с выраженной осевой симметрией. В реальном режиме времени на поверхности происходит трансформация области, содержащей фтор-индуцированную структуру, с изменением ее формы и размера.

На рис. 3, *a*, *б*, *в* показаны три последовательно записанные СТМ-изображения при одинаковых параметрах сканирования (время сканирования кадра равнялось 30 мин), где пунктирной линией отмечена область, содержащая фтор-индуцированную структуру. Отчетливо просматривается уменьшение размеров области со сформированной изначально структурой через 1 ч наблюдения. Рис. 4 демонстрирует СТМ-изображение поверхности пла-

тины. Из характерных особенностей этого изображения следует отметить шум в виде тонких штрихов, вытянутых вдоль направления сканирования. Этот шум не зависит от системы обратной связи, туннельного зонда и количества последовательных циклов ионной бомбардировки и термической обработки, проведенных для чистки образца. Можно утверждать, что этот шум обусловлен природой самой наблюдаемой поверхности. Мы связываем факт наличия этого шума с наличием на поверхности платины поверхностной диффузии атомов водорода [22]. Чтобы понять природу возникновения фтор-индуцированных структур, были проведены РФЭС-измерения при аналогичных экспериментальных условиях. Результаты представлены

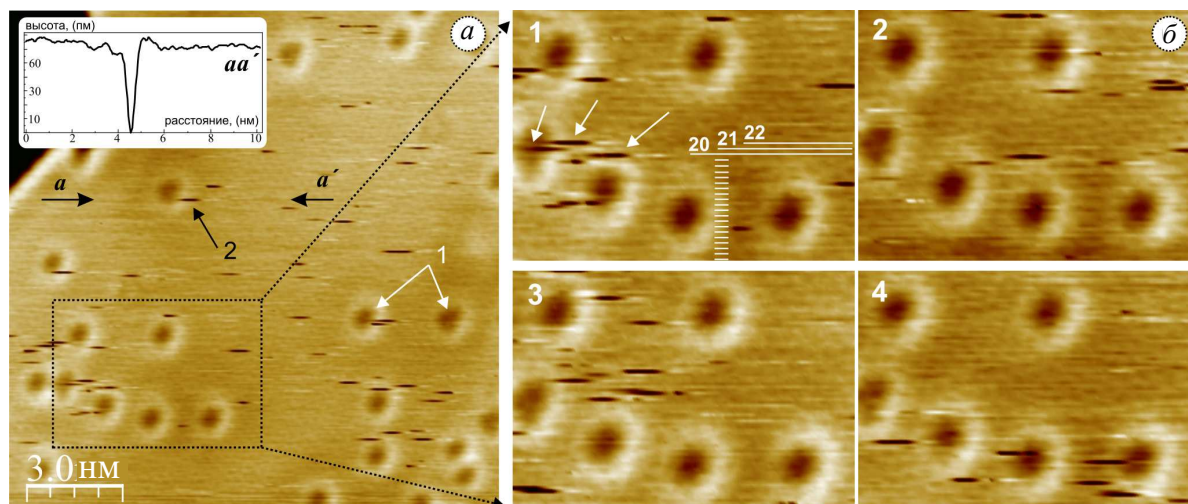


Рис. 4. *a* — Топографическое СТМ-изображение ($15 \text{ nm} \times 15 \text{ nm} \times 0.3 \text{ nm}$; $U_t = +1 \text{ В}$, $I_t = 50 \text{ пА}$) чистой поверхности Pt(111). Стрелками (1) и (2) указаны типичный вид подповерхностных примесей в кристалле Pt и хаотичные единичные дефекты в виде резкого короткого провала, локализованного вдоль одной скан-линии соответственно. В реальности наблюдаемые «провалы» представляют собой артефакт изображения в результате столкновения атома водорода с зондом СТМ во время сканирования поверхности. Профиль сечения (вдоль направления aa') для типичного «провала» показан на вставке к *a*. *б* — Серия последовательных изображений для одного и того же участка поверхности, отмеченного пунктирным прямоугольником на *a*, ($6.5 \text{ nm} \times 4.8 \text{ nm} \times 0.1 \text{ nm}$). Единичные «провалы» указаны стрелками на примере (1, *б*), где видно, что «провалы» вытянуты вдоль одной скан-линии (например, 20, 21, и 22) и локализованы строго в пределах этой же скан-линии. Появление подобных дефектов носит случайный характер, что наглядно видно из статистики (1–4)

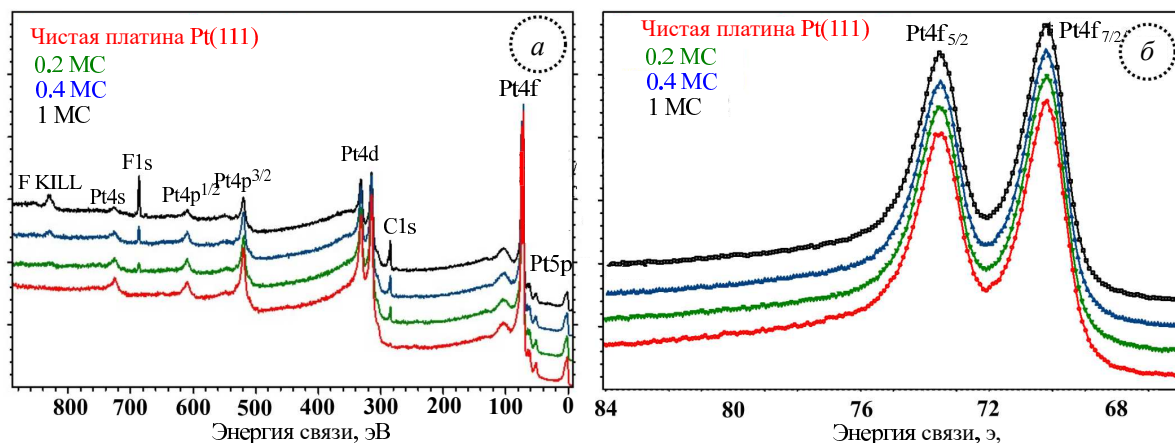


Рис. 5. *a* — Обзорный РФЭС спектр Al K α . Спектры представлены для покрытия 0.2 МС, 0.4 МС и 1 МС. Все спектры получены при угле в 60° по отношению к нормали к поверхности; *б* — калибровочный Pt 4f-спектр для чистой поверхности Pt(111) и системы $\text{C}_{60}\text{F}_{18}/\text{Pt}(111)$

на рис. 5, *a*. Обзорный спектр РФЭС не показывает никаких изменений в форме и интенсивности пиков Pt4s, Pt4p $^{1/2}$, Pt4p $^{3/2}$, Pt4d и Pt4f при различных степенях покрытия поверхности молекулами фторфуллерена $\text{C}_{60}\text{F}_{18}$, что указывает на неизменность химического состояния платины.

График, изображенный на рис. 5, *б*, показывает спектр Pt 4f при различных температурах и временах, прошедших с момента нанесения молекул фторфуллерена $\text{C}_{60}\text{F}_{18}$, на поверхность Pt(111). На нем не наблюдается никаких вариаций с изменением температуры и времени. Кроме того, не наблюдалось изменений в спектре вплоть до дости-

жения угла 80° относительно нормали к поверхности (неупругая средняя длина свободного пробега при этом равна 2.65 \AA). То есть глубина, с которой мы получаем информацию, превосходит межслойное расстояние для поверхности Pt(111) (1.7 \AA). Таким образом, даже приповерхностные слои платины не подвержены изменениям, а наблюдаемые на СТМ-изображениях структуры на поверхности Pt(111) обусловлены наличием атомов фтора. Согласно оценкам, приведенным в [23], энергия связи атома фтора на поверхности Pt(111) равна 3.62 эВ/ат . Таким образом, отщепление атомов фтора от углеродного остова молекулы фторфул-

лерена и их осаждение на Pt(111) выглядит энергетически выгодным. Механизм возникновения фториндуцированных структур можно описать следующим образом. Отщепленные от углеродного остова атомы фтора непосредственно соединяются с атомами водорода и покидают поверхность в виде фтороводорода. В пользу этого свидетельствуют и данные работы [22], где авторы с помощью СТМ, РФЭС высокого разрешения и температурно-программируемой десорбции с использованием расчетов на основе теории функционала плотности показали, что переход от физически адсорбированного к хемосорбированному состоянию молекул C_{60} на Pt(111) связан с присутствием остаточного невидимого в СТМ водорода на поверхности (обнаруженного методом температурно-программируемой десорбции), который препятствует образованию связей между фуллереном и Pt. Зарождение фториндуцированных структур происходит в момент, когда все атомы водорода на поверхности Pt(111) взаимодействовали с атомами фтора и покинули поверхность в виде образовавшегося летучего соединения HF, а вновь отщепленные от углеродного остова молекулы фторфуллерена атомы фтора адсорбируются на поверхности Pt(111). В связи с тем, что водород является основным остаточным газом сверхвакуумных систем, он вновь адсорбируется на поверхности Pt(111), вступая в реакцию с атомами фтора и образуя фтороводород, легко десорбируемый с поверхности. Таким образом, происходит распад изначально сформированных F-индуцируемых структур. Энергия связи для молекулы HF равна 5.84 эВ/атом и значительно превосходит энергию

связи молекулярного фтора (1.6 эВ/атом) [24]. Поэтому атомы фтора, отщепленные от углеродного остова молекулы фторфуллерена, предпочитают соединение с атомами водорода, и десорбция в виде фтороводорода выглядит наиболее вероятной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами РФЭС и СВВ СТМ была изучена адсорбция атомов фтора на поверхности Pt(111). В качестве источника фтора были выбраны молекулы фторфуллеренов $C_{60}F_{18}$ и $C_{60}F_{48}$. Молекулы $C_{60}F_{18}$ и $C_{60}F_{48}$ начинают терять фтор сразу после осаждения, скорость потери зависит от степени покрытия поверхности и времени с момента нанесения. Было показано, что атомы фтора не образуют фторидов платины. При нанесении 0.4 МС молекул $C_{60}F_{18}$, $C_{60}F_{48}$ на Pt(111) было обнаружено возникновение на поверхности псевдостабильных структур, образованных атомами фтора. Параметры возникающих структур зависят от степени покрытия поверхности Pt(111) молекулами фторфуллеренов, степени их распада и, следовательно, концентрации атомов фтора. После 4–5 сут непрерывного наблюдения F-индуцированные структуры полностью исчезают из-за локальных химических реакций фтора с водородом с образованием летучего фтороводорода.

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

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

- [1] Jones R.G. // *Progress in Surface Science*. **27**, N 1-2, 25 (1988).
- [2] Andryushchkin B.V., Pavlova N.V., Eltsov K.N. // *Surface Science Reports*. **73**, N 3, 83 (2018).
- [3] Nakano H., Matsunaga T., Mori T. et al. // *Chemistry of Materials*. **33**, N 1, 459 (2020).
- [4] Blanpain P., Capus G., Plaussère J.-C. // *Chimia*. **59**, N 12, 894 (2005).
- [5] McFeely F.R., Morar J.F., Shinn N.D. et al. // *Phys. Rev. B*. **30**, N 2, 76 (1984).
- [6] Morar J.F., McFeely F.R., Shinn N.D. et al. // *Appl. Phys. Lett.* **45**, N 2, 174 (1984).
- [7] Qiu S.R., Yarmoff J.A. // *Phys. Rev. B*. **63**, N 11, 115409 (2001).
- [8] Bechtold E. // *Applications of Surface Science*. **7**, N 3, 231 (1981).
- [9] Chilingarov N.S., Knot'ko A.V., Borschevsky A.Y. et al. // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. **97**, N 9, 2020 (2023).
- [10] Tressaud A., Pintchovski F., Lozano L. et al. // *Materials Research Bulletin*. **11**, N 6, 689 (1976).
- [11] Bairagi K., Bellec A., Chumakov R.G. et al. // *Surface Science*. **641**, 248 (2015).
- [12] Makarov V.K., Chumakov R.G., Lebedev A.M. et al. // *Crystallography Reports*. **67**, N 6, 969 (2022).
- [13] Oreshkin A.I., Muzychenko D.A., Oreshkin S.I. et al. // *The Journal of Physical Chemistry C*. **122**, N 42, 24454 (2018).
- [14] Petukhov M.N., Oreshkin A.I., Muzychenko D.A. et al. // *The Journal of Physical Chemistry C*. **124**, N 1, 347 (2019).
- [15] Oreshkin A.I., Muzychenko D.A., Oreshkin S.I. et al. // *Nano Research*. **11**, N 4, 2069 (2018).
- [16] Oreshkin A.I., Muzychenko D.A., Oreshkin S.I. et al. // *JETP Letters*. **111**, N 6, 357 (2020).
- [17] Bolbach G., Blais J.C. // *Surface Science*. **111**, N 3, 575 (1981).
- [18] Bolbach G., Blais J. C., Brunot A., Marilier A. // *Surface Science*. **90**, N 1, 65 (1979).
- [19] Horcas I., Fernández R., Gomez-Rodriguez J. et al. // *Rev. Sci. Instrum.* **78**, 013705 (2007).
- [20] Fairley N., Fernandez V., Richard-Plouet M. et al. // *Applied Surface Science Advances*. (2021). **5**, 100112.
- [21] Van Lier G., Cases M., Ewels C. P. et al. // *The Journal of organic chemistry*. **70**, N 5, 1565 (2005).
- [22] Pinardi A.L., Biddau G., van De Ruit K. et al. // *Nanotechnology*. **25**, N 38, 385602 (2014).
- [23] Pašti I.A., Gavrilov N.M., Nemanja M. et al. // *Journal of the Serbian Chemical Society*. **78**, N 11, 1763 (2013).
- [24] Wenthold P.G., Squires R.R. // *The Journal of Physical Chemistry*. **99**, N 7, 2002 (1995).

Local Chemical Reactions Involving Fluorine Atoms on the Pt(111) Surface

D.A. Muzychenko¹, S.I. Oreshkin^{2,a}, M.N. Petukhov³, M.A. Ardamin¹, M.Yu. Aleksandrov¹,
V.I. Panov¹, A.I. Oreshkin¹

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

²*Sternberg State Astronomical Institute Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

³*Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB) UMR 6303 CNRS-Universite Bourgogne Europe, 21078
Dijon, FRANCE*

E-mail: ^a oreshkinai@my.msu.ru

The adsorption of fluorine atoms on the Pt(111) surface was studied using ultra-high-vacuum scanning tunneling microscopy (UHV STM) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). Fluorofullerene molecules were chosen as fluorine sources. When deposited on Pt(111), fluorine atoms are cleaved from the carbon backbone, forming new surface structures. Varying the stoichiometric composition, as well as the number of deposited fluorofullerene molecules, allows for varying fluorine atom concentrations on the surface. Using C₆₀F₁₈ molecules, the formation of a fluorine-induced surface structure was observed. The observed structure was unstable and completely disappeared within 3-4 days of continuous STM monitoring. Deposition of C₆₀F₄₈ molecules on Pt(111) also resulted in the formation of unstable structures on the surface. XPS spectra clearly demonstrated the absence of chemical interaction between platinum and fluorine. The presence of hydrogen on the platinum surface and its interaction with fluorine to form volatile hydrogen fluoride explains the disappearance of the observed structures over time.

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

Keywords: scanning tunneling microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, fluorofullerene.

Received 02 January 2026.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2026. **81**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

- Музыченко Дмитрий Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: mda@spmlab.ru.
- Орешкин Сергей Иванович — ст. науч. сотрудник ГАИШ им. П. К. Штенберга МГУ; e-mail: sioresh@yahoo.com.
- Петухов Михаил Николаевич — Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB) UMR 6303 CNRS-Universite Bourgogne Europe, 21078 Dijon, FRANCE; e-mail: mikhail.petukhov@ube.fr.
- Ардамин Максим Алексеевич — студент; e-mail: maxval.aa@gmail.com.
- Александров Михаил Юрьевич — студент; e-mail: misha.alexandrov2014@yandex.ru.
- Панов Владимир Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: panov@spmlab.phys.msu.ru.
- Орешкин Андрей Иванович — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: oreshkinai@my.msu.ru.