

02;11;12

Взаимодействие молекул C_{60} с поверхностью (100)Mo

© Н.Р. Галль, Е.В. Рутьков, А.Я. Тонтегоде, М.М. Усуфов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 19 августа 1998 г.)

В сверхвысоковакуумных условиях изучена адсорбция, начальные стадии роста пленок и трансформация адслоя из молекул C_{60} на поверхности (100)Mo при нагреве. Показано, что молекулы C_{60} сохраняют свою природу в адсорбированном состоянии вплоть до 760 К. При комнатной температуре наблюдается послыйный рост пленки фуллерита, при 500–600 К поверх неплотно упакованного монослоя с оценочной концентрацией молекул C_{60} $(1.3 \pm 0.2) \cdot 10^{14} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2}$ растут кристаллиты в форме башен, причем занимаемая ими доля площади зависит от температуры и плотности падающего потока молекул фуллеренов, но после достижения некой стационарной величины почти не зависит от времени экспозиции.

Введение

Фуллерены — новая, относительно недавно обнаруженная форма существования углерода. В отличие от таких его широко известных аллотропных форм, как алмаз — трехмерный кристалл кубической сингонии, графит — набор слабо связанных между собой двумерных плоскостей или карбин — длинные углеродные нити, фуллерены, как правило, — индивидуальные молекулы строго определенных размеров и состава C_{60} , C_{70} , C_{84} , C_{100} и другие молекулы из этого гомологического ряда. Все молекулы фуллеренов состоят только из углеродных атомов, сетка которых образует замкнутый каркас, а внутри имеется свободная от вещества полость.

Среди фуллеренов наиболее доступна для исследования молекула C_{60} . Молекула C_{60} представляет собой сферу с диаметром, проведенным через центры составляющих ее атомов углерода, 7.08 Å.

И для практических, и для научных целей необходимо понимать, как именно молекулы фуллеренов взаимодействуют с веществом, в частности с твердыми поверхностями. Фундаментальное изучение адсорбции молекул C_{60} на поверхности твердых тел — задача достаточно сложная в основном в связи со сложной структурой объекта изучения. Тем не менее к настоящему моменту имеется как минимум несколько десятков работ, где такое изучение проводилось различными методами как теоретически, так и экспериментально. В качестве подложек обычно используют кремний [1–5], благородные [6–8] или тугоплавкие металлы [9].

Ранее нами была изучена адсорбция молекул C_{60} на поверхности (111)Ir [10,11] и (10 $\bar{1}$ 0)Re [12,13]. Были определены контактная и термическая стабильности молекул C_{60} на поверхности металлов, изучена трансформация адслоя молекул C_{60} при нагреве подложки. Оказалось, что адсорбированные молекулы C_{60} сохраняют свою фуллереновую природу вплоть до некоторой, зависящей от типа подложки, температуры (~ 800 К на Re, ~ 1000 К на Ir). При более высоких температурах молекулы разрушаются, а высвобождающийся в адслое углерод растворяется в объеме подложки (на Re) или

графитизируется (на Ir). Впервые наблюдался интересный эффект — интеркалирование, т.е. самопроизвольное проникновение молекул C_{60} , адсорбированных на монослойной графитовой пленке на иридии [11] под эту пленку. На базе наших экспериментов было создано практическое устройство — сверхвысоковакуумный регенератор для источника потока атомов углерода, свободного от углеродных кластеров.

В работах [10,11] мы обнаружили, что C_{KV} оже-пик в молекулах C_{60} имеет энергию 269 eV, почти на 3 eV ниже, чем, скажем, в графите, карбидах металлов или в адсорбированных углеродных кластерах. Эта энергия оже-пика наблюдается как в случае толстых пленок адсорбированных молекул C_{60} (5–10 монослоев), так и для субмонослойных покрытий. Было предложено использовать это явление для различения адсорбированных на поверхности фуллеренов от других возможных состояний углерода.

В данной работе мы изучили адсорбцию молекул C_{60} на широко используемой в электронной, в вакуумной технике и в технологии выращивания алмазных пленок поверхности молибдена. Ранее мы подробно изучили процессы, протекающие при взаимодействии углерода с этой поверхностью, и достаточно точно знали температурные интервалы начала его растворения, условия образования поверхностного и объемного карбидов и т.п. [14,15]. Кроме того, молибден обладает интенсивными оже-пиками с энергиями 186 и 221 eV, что делает его крайне удобным для изучения адсорбции сильно экранирующих веществ, таких как молекулы C_{60} .

Образцы и методика эксперимента

Эксперименты проводились в оже-спектрометре высокого разрешения, описанном в [16], в сверхвысоковакуумных ($P \sim 10^{-10}$ Torr) условиях. Имелась возможность записывать оже-пики непосредственно с нагретых образцов в интервале 300–2100 К. Образцами служили прямонакальные молибденовые ленты размером $(0.02 \times 1 \times 40)$ mm, которые очищались и ха-

рактизовались по стандартной процедуре. При этом ленты текстурировались и на поверхность выходила грань (100). Работа выхода поверхности составляла $e\phi = 4.40 \text{ eV}$, поверхность была однородна по $e\phi$. По данным электронно-микроскопических исследований средний размер зерен составлял $\sim 15 \mu\text{m}$.

Фуллерены напылялись на всю поверхность ленты под углом 65° к ее нормали из кнудсеновской ячейки. В ячейку загружалась навеска молекул C_{60} ($\sim 0.05 \text{ g}$) с чистотой 99.5%. После тренировки ячейка давала стабильный и легко регулируемый поток молекул фуллеренов с плотностью $\nu_{\text{C}} = 10^{10} - 10^{13} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Изучение адсорбции фуллеренов на поверхности металлов крайне затруднено тем, что такая поверхность, даже изначально чистая, в процессе опытов неизбежно легируется углеродом, высвобождающимся в адслое при распаде молекул. В наших опытах после серии измерений поверхность очищалась прогревом до $T = 2100 \text{ K}$. При этом все недесорбировавшиеся молекулы C_{60} распались на атомы, углерод растворялся в объеме подложки, а на поверхности имелся лишь поверхностный карбид (ПК) (MoC) с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot \text{cm}^{-2}$ [14,15]. ПК — это сильно связанные атомы углерода, удаляющиеся с поверхности Мо лишь при $T > 1400 \text{ K}$ путем растворения их в объеме металла. При понижении температуры до $T < 1400 \text{ K}$ атомы углерода выделяются из объема на поверхность и снова образуют ПК. Логично считать, что их концентрация остается неизменной при адсорбции молекул фуллеренов, а оже-сигнал, эмиттируемый этими атомами, экранируется в той же степени, что и оже-сигнал молибдена. Это предположение оправдывается близостью энергий обоих оже-сигналов ($E_{\text{Mo}} = 221 \text{ eV}$, $E_{\text{C}} = 273 \text{ eV}$). Чтобы выявить "чистый" оже-сигнал от молекул фуллеренов, подставка, обязанная своим происхождением ПК, вычиталась, причем для вычитания использовалась ее начальная величина (до адсорбции молекул C_{60}), уменьшенная в той же степени, в какой уменьшился оже-сигнал подложки. Вопрос вычитания или невычитания подставки в каждом конкретном случае оговаривается.

Абсолютная калибровка потока молекул C_{60}

Интенсивность оже-сигнала углерода от молекул C_{60} сама по себе не дает информации о количестве этих молекул на поверхности, поскольку атомы С в адсорбированной молекуле сложным образом экранируют друг друга. Для калибровки мы определили, какая степень экранировки оже-сигнала подложки соответствует тому или иному количеству молекул C_{60} на поверхности. Для этого на поверхность вспомогательной иридиевой ленты, помещенной в оже-спектрометр параллельно рабочей молибденовой, напылили молекулы C_{60} до небольшой, по данным [10], заведомо субмонослойной концентрации. Они уменьшили оже-пик Ir с энергией $E = 169 \text{ eV}$

в 1.6 раз. После этого ленту нагрели до $T = 1700 \text{ K}$. Как было показано нами ранее, при этом молекулы фуллеренов разлагаются, высвободившийся углерод активно мигрирует по поверхности, разбегается поровну на обе стороны ленты и графитизируется. Оже-сигнал образовавшегося графита был нами измерен и составил чуть меньше, чем 1/2 монослоя. Поскольку концентрация углерода в монослое графита $N_{\text{C}} = 3.9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, то изначально на поверхности находилось $\sim 3.9 \cdot 10^{15}$ атомов С или $6.5 \cdot 10^{13}$ молекул C_{60} на cm^2 . Считая, что то же самое число молекул фуллерена экранируют оже-сигнал молибдена в то же число раз, что и оже-сигнал иридия (а энергии обоих оже-сигналов — 169 и 221 eV очень близки), мы можем откалибровать субмонослойные покрытия молекул C_{60} на молибдене. Полагая, что коэффициент accommodations молекул на поверхности близок к единице (в пользу этого свидетельствуют большие значения энергий сублимации молекул C_{60} при их адсорбции на различных подложках), можно откалибровать падающий на поверхность поток. В данной примере он составил $\sim 6.5 \cdot 10^{11} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Адсорбция при комнатной температуре

На рис. 1 представлены изменения оже-сигналов углерода и молибдена при адсорбции постоянным потоком молекул C_{60} на (100)Мо при комнатной температуре. На кривой 2 представлен оже-сигнал углерода, из которого вычтен вклад поверхностного карбида. Как видно, оже-сигнал молибдена монотонно уменьшается и падает до нуля, а оже-сигнал углерода растет почти линейно вплоть до времени напыления $\sim 250 \text{ s}$, а затем скорость его роста замедляется и он весьма резко входит в насыщение. Это означает, что, начиная с $t = 250 \text{ s}$,

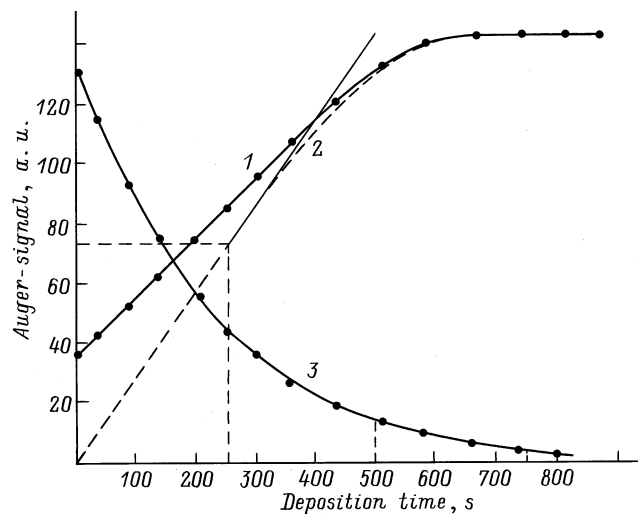


Рис. 1. Напыление молекул C_{60} на (100)Мо при комнатной температуре: плотность потока $\nu_{\text{C}_{60}} = 6.5 \cdot 10^{11} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 1 — оже-сигнал углерода, 2 — оже-сигнал углерода с вычтенным вкладом поверхностного карбида, 3 — оже-сигнал молибдена.

вновь поступающие молекулы C_{60} экранируют не только подложку, но и оже-сигнал углерода от ранее адсорбированных молекул. Таким образом, можно утверждать, что при $t = 250$ s завершилось заполнение первого монослоя и начался рост последующих.

Что же такое монослой молекул C_{60} на (100)Mo? Отметим, что первый монослой экранирует оже-сигнал подложки очень сильно — в ~ 2.9 раза! Аналогичную экранировку дает пленка, содержащая ~ 2.5 монослоя графита, а полное количество углерода в такой пленке составляет $1.0 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Возможно ли это? Если для грубой оценки положить, что в нашем адслое содержится примерно такое же количество углерода, но объединенное в молекулы C_{60} , то на поверхности должно находиться $\sim 1.6 \cdot 10^{14}$ молекул на cm^2 .

Исходя из сделанной нами абсолютной калибровки потока, можно утверждать, что за 250 s на поверхность упадет $\sim 1.63 \cdot 10^{14} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2}$, что хорошо соответствует приведенной оценке. Попробуем понять, можно ли разместить такое количество молекул на поверхности в один слой. Диаметр молекулы C_{60} , проведенный через центры ее атомов, составляет 7.1 \AA , а требуемый нам структурно-химический диаметр больше на величину ковалентного диаметра атома С на 1.4 \AA , т.е. составляет 8.5 \AA [17]. Концентрация шаров с таким диаметром на поверхности при наиплотнейшей упаковке составит $N_{\text{cl-packed}} = 1.64 \cdot 10^{14} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2}$, что хорошо совпадает с приведенной выше оценкой и позволяет полагать, что на (100)Mo растет плотноупакованный монослой из молекул C_{60} .

А как происходит дальнейший рост пленки? Из данных оже-спектроскопии можно сделать некоторые оценки. Предположим, во втором слое концентрация молекул C_{60} та же, что и в первом, т.е. составляет $\sim 1.64 \cdot 10^{14} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2}$. Тогда для нанесения этого слоя потребуется еще 250 s, а экранировка подложки после завершения его строительства должна составить $3 \times 3 = 9$ раз. Как видно из рис. 1, при времени напыления 500 s подложка заэкранирована в 9.4 раз, а при времени напыления 750 s (что соответствует образованию третьего слоя) — в 26.5 раз. Указанные данные свидетельствуют в пользу послойного механизма роста пленки фуллерита на (100)Mo при комнатной температуре.

Отжиг пленки фуллерита на (100)Mo

На рис. 2 представлено изменение оже-сигналов углерода и Mo при отжиге толстой пленки фуллерита. По оценке толщина пленки составляет ~ 6.5 слоев. Видно, что вплоть до 750 K оже-сигналы адсорбата и подложки не меняются. Энергия оже-пика углерода 269 eV, что свидетельствует о том, что на поверхности находятся именно молекулы C_{60} . В интервале 750–820 K пленка быстро разрушается — падает оже-сигнал углерода, растет оже-сигнал подложки. При указанных температурах даже отдельные атомы углерода не растворяются в объеме

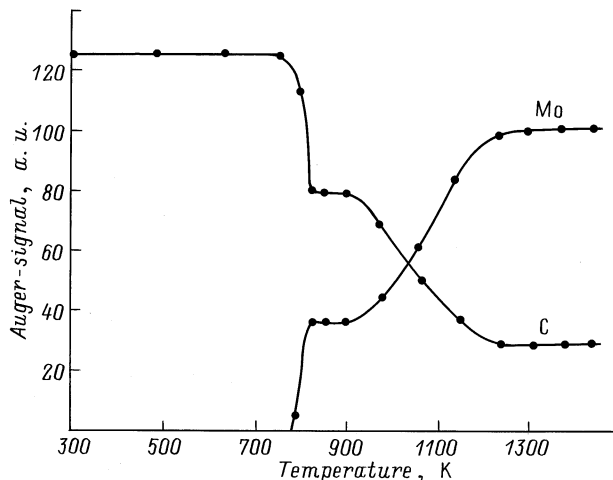


Рис. 2. Отжиг толстой пленки молекул C_{60} на (100)Mo. Начальное состояние — пленка молекул C_{60} , напыленная при комнатной температуре. Толщина пленки ~ 6.5 слоев.

молибдена [15]. Молекулы C_{60} напылены равномерно на всю поверхность ленты — уход частиц вследствие миграции маловероятен. Следовательно, единственная правдоподобная причина ухода молекул C_{60} — термодесорбция.

Вплоть до 900 K на поверхности остается некое углеродное покрытие экранирующее оже-сигнал подложки в 2.7 раза. Это не фуллерены, так как энергия оже-пика составляет 272 eV. Видимо, основная часть молекул C_{60} десорбируется, а на поверхности остается лишь слой остатков углеродных каркасов фуллереновых молекул. При $T > 900$ K углерод из этого слоя начинает растворяться в объеме молибдена и при $T > 1300$ K на поверхности имеется лишь ПК. Как было показано нами ранее [14,15], при этих температурах уже неважно, в какой форме углерод был адсорбирован на поверхность, поскольку все молекулы и их остатки распались, в адслое имеются лишь отдельные атомы С.

Было важно понять, вплоть до какой температуры отдельные адсорбированные молекулы C_{60} сохраняют свою природу. Для этого на поверхность напыляли малые количества молекул C_{60} и отжигали полученный адслой. Оказалось, что отдельные молекулы C_{60} не разлагаются при адсорбции на Mo вплоть до $T \leq 760$ K и при более низких температурах сохраняют свою структуру.

Напыление при повышенной температуре

Предыдущие опыты позволили выделить интервал температур, в котором можно говорить об адсорбции на Mo собственно фуллереновых молекул, а не их осколков. Граничной для опытов была температура 760 K, при которой молекулы C_{60} заведомо не разлагаются на поверхности.

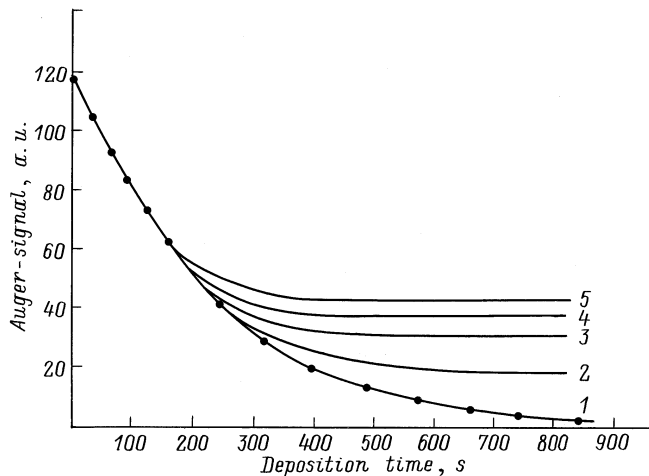


Рис. 3. Изменения оже-сигнала Mo при напылении молекул C_{60} на (100)Mo при различных температурах T , К: 1 — 300, 2 — 600, 3 — 645, 4 — 680, 5 — 700. Плотность потока та же, что и на рис. 1.

Как мы уже видели, при толщине адслоя, большей, чем один монослой, степень экранировки оже-сигнала подложки становится более информативной, чем интенсивность оже-сигнала адсорбата, которая слабо меняется при росте второго и последующих слоев. На рис. 3 представлены изменения оже-сигнала молибдена при напылении молекул C_{60} при разных температурах одним и тем же потоком. Как видно, на начальных этапах все кривые совпадают, однако затем расходятся. Кривые, снятые при каждой температуре, выходят каждая на свою характерную полочку, после чего изменяются очень слабо. Хочется отметить, что реальные различия между толщинами адслоев, представленными, скажем, кривыми 3 и 4, весьма значительны и вполне могут составлять порядка половины монослоя и более. При этом различия в температуре напыления составляют лишь 40 К!

Физическая картина процессов была абсолютно непонятной, и чтобы прояснить ее, мы изменили опыт: оже-спектры записывались в потоке падающих на поверхность молекул фуллеренов непосредственно при высоких температурах. На рис. 4 представлены соответствующие стационарные состояния оже-сигналов углерода и подложки, соответствующие полочкам на рис. 3. В опыте молекулы C_{60} напыляли при $T = 760$ К до достижения стационарного состояния. Затем температуру понижали, записывали следующее стационарное состояние, и т.д.

Видно, что в интервале 760–700 К имеет место полочка (кривая 1 на рис. 4), когда количество молекул C_{60} , накопившееся на поверхности, не зависит от температуры. Концентрация молекул в этом состоянии такова, что оже-сигнал подложки экранируется в 2.5 раза. На основании данных, представленных на рис. 1, мы оценили эту концентрацию как $\sim (1.3 \pm 0.2) \cdot 10^{14} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2}$, т.е. близко к наиплотнейшему когерентному покрытию на нереконструированной грани (100)Mo. При нагреве

выше 800 К молекулы C_{60} из этого состояния не десорбируются, но разлагаются и их осколки остаются в адслое. В то же время при температуре ниже 760 К, судя по энергии оже-пика, молекулы фуллеренов не поверхности сохраняют свою природу. Это состояние мы назвали высокотемпературным (ВТ) монослоем. Если теперь снизить температуру, скажем, градусов на двадцать, то очень быстро достигается иное стационарное состояние, характеризующееся своей степенью экранировки и своей интенсивностью оже-сигнала углерода. Снизим температуру еще немного — новое состояние, и т.д. Если поток молекул фуллеренов увеличить, то те же стационарные состояния достигаются при более высоких температурах (рис. 4, кривая 2).

Какова же природа этих состояний? Сразу напрашивается мысль, а может быть, это равновесная кривая, и все определяется просто адсорбционно-десорбционным равновесием на поверхности? Тогда давайте выключим поток или просто поднимем температуру — и мы должны вернуться назад по кривой. Однако ни того, ни другого не происходит: выключение потока, равно как и подъем температуры (конечно, в пределах до 760 К), никак не изменяет достигнутых состояний, они оказываются как бы замороженными. Если же температуру поднять выше 800 К, то избыток молекул C_{60} десорбируется и на поверхности снова останется лишь стандартный слой их осколков. Таким образом, представленная на рис. 4 кривая носит неравновесный характер.

Что же это значит? Когда мы достигаем наших стационарных состояний в потоке молекул, то либо вновь поступающие молекулы десорбируются с поверхности, либо мы их просто не чувствуем. Для решения этой дилеммы был поставлен следующий опыт. Изучалась десорбция молекул C_{60} из одного из таких состояний, полученного при 645 К, но в условиях, когда в одном случае напыление длилось 4 min, а в другом — 25 min. Оказалось, что время десорбции молекул с поверхности в описанных двух случаях существенно различается: если в первом случае достижение ВТ монослоя молекул

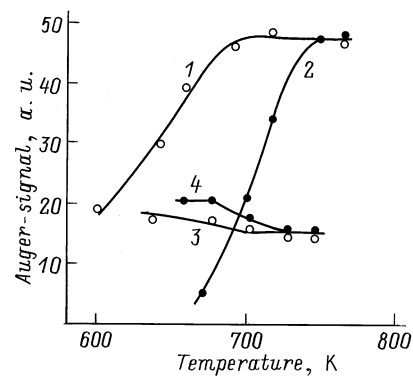


Рис. 4. Стационарные значения оже-сигналов углерода и Mo при напылении молекул C_{60} при повышенных температурах: 1, 2 — оже-сигнал молибдена; 3, 4 — оже-сигнал углерода (уменьшен в 2 раза); $\nu_{C_{60}}$, $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$: 1, 3 — $6.5 \cdot 10^{11}$, 2, 4 — $6.9 \cdot 10^{12}$.

C_{60} происходит за 1.5–2 min, то во втором требуется в несколько раз большее время — ~ 20 min! Подобная затяжка процесса десорбции свидетельствует, что молекулы C_{60} копятся в адслое, однако оже-спектроскопия не регистрирует их присутствия.

Строение адслоя при высокотемпературном напылении

На наш взгляд, все наблюдаемые закономерности можно объяснить, если предположить, что на поверхности растут кристаллиты из молекул C_{60} . Схематически описываемая модель представлена на рис. 5. Кристаллиты растут поверх высокотемпературного монослоя и имеют форму башен. Каждое из регистрируемых на опыте стационарных состояний соответствует своей доле площади, занятой кристаллитами. Экспозиция в постоянном потоке почти не приводит к увеличению этой совокупной площади, а приводит лишь к росту башен в высоту. Однако снижение температуры либо увеличение потока сразу приводит к зарождению и росту новых башен и, как следствие, к уменьшению площади, свободной от них.

Рассмотрим, каковы будут оже-сигналы углерода и подложки в случае реализации подобного механизма роста. Оже-сигнал углерода будет определяться эмиссией из 2–3 верхних слоев каждой башни и не будет зависеть от их высоты. Оже-сигнал подложки будет наблюдаться лишь с участков, свободных от башен, и будет строго пропорционален площади таких участков.

Однако метод оже-электронной спектроскопии лишь косвенный по отношению к топографии поверхности. Хотя никаких других моделей, которые описывали бы все наблюдаемые экспериментальные факты, предложить мы не смогли, все же для ее подтверждения требовались более прямые измерения. Решено было провести их с помощью метода атомной силовой микроскопии (АСМ). Туннельная микроскопия не годится, так как пленка фуллерита является диэлектриком.

Был подготовлен образец, на который молекулы C_{60} адсорбировались при $T = 620$ K в течение 20 min пото-

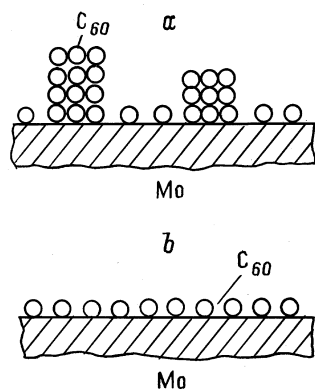


Рис. 5. Предположительная схема строения адслоя при высокотемпературном напылении молекул C_{60} : *a* — кристаллиты в виде башен, *b* — высокотемпературный монослой.

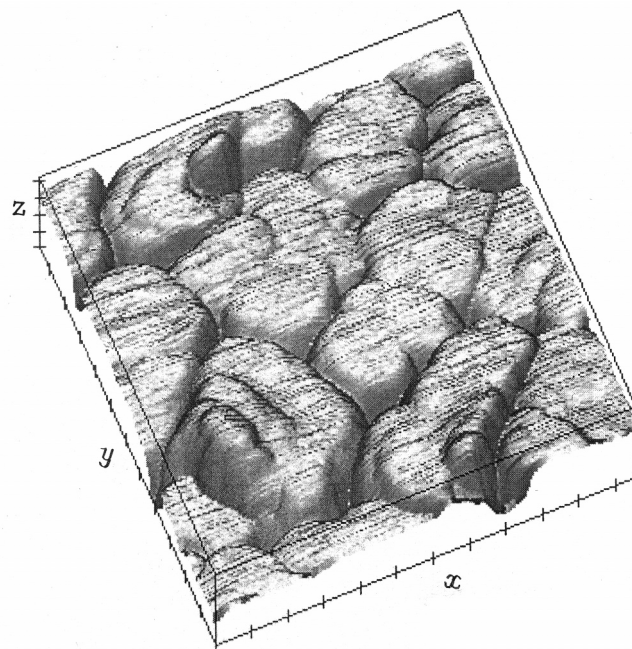


Рис. 6. Микроизображение участка поверхности $(100)Mo$ с выращенными на нем кристаллитами. Одно деление по осям x и y — 100 nm, по оси z — 10 nm.

ком $\nu_{C_{60}} = 1 \cdot 10^{13} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Изменения проводились в комнатных условиях на приборе, обеспечивающем пространственное разрешение, близкое к атомному.

Результаты измерений с помощью АСМ представлены на рис. 6. Отчетливо видны образовавшиеся кристаллиты в виде башен с плоскими вершинами и глубокими провалами между ними. Размеры кристаллитов близки как по площади, так и по высоте, их средний поперечный размер составляет $\sim 3000 \text{ \AA}$, а концентрация на поверхности $\sim 10^9 \text{ cm}^{-2}$. Легко видеть, что кристаллиты занимают $\sim 80\%$ площади образца. Хочется отметить, что по самой своей природе АСМ не может регистрировать глубокие узкие провалы, если их глубина превосходит ширину, так как используемый в качестве зонда кантиливер заточен под углом 28° и при сканировании глубоких и узких провалов дает картину типа представленной на рис. 6.

Представлялось заманчивым рассчитать из данных оже-спектроскопии, какую площадь занимают кристаллиты при различных значениях температуры и плотности потока падающих на поверхность молекул C_{60} . Эту площадь можно определить на основании оже-сигнала подложки, так как оже-электроны Mo могут выйти непоглощенными лишь с площади, свободной от кристаллитов. Для расчетов использовалась формула

$$S_{cr} = 1 - I_{Mo}/I_{Mo}^0,$$

где S_{cr} — доля площади, занятая кристаллитами; I_{Mo} и I_{Mo}^0 — текущее и начальное (под ВТ монослоем) значения оже-сигнала Mo.

По результатам расчетов доля площади, занятая кристаллитами на образце, использованном для измерений

с помощью АСМ, составила $\sim 85\%$. Как видно, эта величина близка к реально наблюдаемой на микроизображении поверхности (ср. с рис. 6).

Обсуждение результатов

Интересно сравнить результаты, полученные на молибдене, с результатами, полученными на других подложках. К настоящему времени нами изучена адсорбция молекул C_{60} на Ir, Re, Mo, а также на монослое графита на Ir, Re и Mo, получены предварительные данные на поверхностях W, Si, Ni. В литературе имеется много данных по адсорбции на кремнии и благородных металлах. Отметим, что общий характер отмеченных выше закономерностей сохраняется на всех металлических подложках. Однако имеются и существенные отличия. Так, на Ir, Re, Mo, Si, Ni при комнатной и даже более высоких температурах молекулы C_{60} сохраняют свою природу, в то время как на вольфраме разлагаются уже при 300 К. На кремнии и никеле, а возможно, и на рении кристаллиты образуются уже при комнатной температуре, в то время как на Mo и вольфраме, видимо, идет послойный рост пленки. На Mo, Ir и Re монослой, видимо, близок к плотноупакованному слою молекул и не зависит от кристаллогеометрии подложки. К настоящему моменту нет никакой физической теории, которая позволила бы заранее прогнозировать характер адсорбции молекул фуллеренов на той или иной подложке, и экспериментальное изучение остается важнейшим источником информации от этих процессах.

Краткие результаты и выводы

Можно утверждать, что на основании полученных экспериментальных данных создана весьма полная физическая картина процессов, протекающих при адсорбции молекул C_{60} на поверхности Mo в интервале температур 300–2000 К и выше. Мо — единственная подложка, на которой удалось столь детально разобраться в картине протекающих процессов.

Адсорбция молекул C_{60} при комнатной температуре приводит к послойному росту пленки фуллерита. Полученная пленка термостабильна до $T = 760$ К, после чего большая часть молекул фуллеренов десорбируется, а оставшиеся с концентрацией порядка $1.3 \cdot 10^{14} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-2}$ разлагаются. Их осколки находятся на поверхности вплоть до $T = 900$ К, после чего начинается растворение углерода в объеме молибдена. Отдельные молекулы адсорбируются на чистой поверхности без разложения вплоть до 760 К, при более высоких температурах адсорбция приводит к их распаду.

Напыление молекул C_{60} при повышенных температурах в области их термостабильности (< 760 К) приводит к росту необычной по структуре пленки в виде кристаллитов, имеющих форму башен. Число кристаллитов зависит от температуры и плотности потока напыляемых молекул, но их общая площадь после достижения

некоторого стационарного значения зависит от времени напыления молекул C_{60} .

Авторы признательны А.Н. Титкову, И.В. Макаренко и З. Вакару за измерения, проведенные методом АСМ.

Работа выполнена при поддержке Российской государственной программы "Фуллерены и атомные кластеры", проект № 98060.

Список литературы

- [1] *Hang Xu, Chen D.M., Creager W.N.* // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 70. P. 1948–1951.
- [2] *Li Y.Z., Chander M., Partin J.C., Weaver J.H.* // Phys. Rev. B. 1992. Vol. 45. P. 13837–13840.
- [3] *Sato T., Sueyoshi T., Iwatsuku M.* // Surf. Sci. Lett. 1994. Vol. 321. P. L137–L142.
- [4] *Chen D., Sarid D.* // Surf. Sci. 1994. Vol. 319. P. 74–82.
- [5] *Beton P.H., Dunn A.W., Moriarty P.* // Surf. Sci. 1996. Vol. 361/362. P. 878–881.
- [6] *Hashizume T., Motai K., Wang X.D.* et al. // JVST A. 1994. Vol. 12. P. 2097–2100.
- [7] *Chen T., Howelles S., Gallager M.* et al. // JVST B. 1991. Vol. 9. P. 2461–2465.
- [8] *Kin D.K., Suh Y.D., Park K.H.* et al. // JVST A. 1993. Vol. 11. P. 1675–1679.
- [9] *Wertheim G.K.* // Sol. St. Commun. 1993. Vol. 88. P. 97.
- [10] *Рутьков Е.В., Тонтегоде А.Я., Грушко Ю.С.* // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. Вып. 6. С. 712–714.
- [11] *Rut'kov E.V., Tontegode A.Ya., Usufov M.M.* // Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 74. P. 758.
- [12] *Gall N.R., Rut'kov E.V., Tontegode A.Ya., Usufov M.M.* // Mol. Mat. 1996. Vol. 7. P. 187–190.
- [13] *Галль Н.Р., Рутьков Е.В., Тонтегоде А.Я., Усуфов М.М.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 23. С. 56–59.
- [14] *Gall N.R., Rut'kov E.V., Tontegode A.Ya., Usufov M.M.* // Appl. Surf. Sci. 1994. Vol. 78. P. 179–184.
- [15] *Рутьков Е.В., Тонтегоде А.Я., Усуфов М.М., Галль Н.Р.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 10. С. 148–153.
- [16] *Gall N.R., Mikhailov S.N., Rut'kov E.V., Tontegode A.Ya.* // Surf. Sci. 1987. Vol. 191. P. 185–202.
- [17] *Gripon C., Legrand L., Rosenman I., Boue F.* // Fullere Sci. and Technol. 1996. Vol. 4. N 6. P. 1195–1270.