

Исследование начальных стадий конденсации Ag и Au на поверхности аморфного углерода при термическом испарении в вакууме

© Д.Г. Громов¹, Л.М. Павлова¹, А.И. Савицкий¹, А.Ю. Трифонов²

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Москва, Зеленоград, Россия

² Научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина,
Москва, Зеленоград, Россия

E-mail: gromadima@gmail.com

(Поступила в Редакцию 30 июня 2014 г.)

В окончательной редакции 18 июля 2014 г.)

С помощью просвечивающей электронной микроскопии систематически изучено формирование массивов наночастиц Ag и Au из паровой фазы на ненагретой тонкопленочной подложке из аморфного углерода. Была обнаружена существенная зависимость размера частиц и плотности их расположения на поверхности от количества испаряемого Ag или Au. В частности, для навески золота ~ 2 mg преобладает диаметр кластеров ~ 9 nm при поверхностной плотности распределения $\sim 10\,000\ \mu\text{m}^{-2}$, в то время как при испарении более крупной навески ~ 11 mg преобладает диаметр ~ 35 nm при поверхностной плотности распределения $\sim 200\ \mu\text{m}^{-2}$. Представлено феноменологическое описание процесса формирования массива наночастиц путем термического испарения и конденсации в вакууме на ненагретую поверхность. Выделены особенности процесса, которые позволяют сделать вывод, что когда произошло зарождение частицы Ag или Au на поверхности, возникает поток парообразного Ag или Au, направленный на эту частицу, что поддерживает ее в горячем состоянии и обуславливает ее рост.

1. Введение

Выявление и наблюдение размерных и квантово-размерных эффектов у наноразмерных структур в последние три десятилетия дало толчок к бурному развитию нанотехнологий и научных исследований в данной области. Массивы кластеров нанометровых размеров привлекают интерес исследователей благодаря широкому кругу возможных применений таких структур. В частности, металлические наночастицы используются в качестве катализатора для роста углеродных нанотрубок [1–3], нитевидных нанокристаллов из кремния и других полупроводников [4–8], в качестве катализатора различных химических процессов [9,10], для спектроскопии усиленной поверхностью комбинационного рассеяния [11,12], для медицинских целей [13,14], для ячеек памяти [15–17], просветляющих покрытий в преобразователях солнечной энергии [18–20], для фотоники и плазмоники [21–23].

Физическое осаждение из газовой фазы на поверхность твердого тела является одним из приемов формирования массива наночастиц [24–31]. Традиционно метод вакуум-термического испарения и конденсации используется для формирования тонких пленок. По этой причине рост тонких пленок этим методом подробно изучался и неоднократно описан [24,32–39]. Тем не менее, остается еще ряд явлений, имеющих место при физической конденсации в вакууме, которые ясны не

до конца. В частности, среди них можно выделить следующие:

- на ранних стадиях конденсации испаренного материала на поверхность твердой фазы коэффициент прилипания (или конденсации) оказывается низким (значительно меньше 1), т.е. только меньшая часть атомов, ударившихся о подложку, конденсируется на ней;
- когда есть зародыши сверхкритического размера, новые мелкие кристаллические зародыши практически не образуются и не растут;
- после закрытия заслонки рост пленки на поверхности твердой фазы продолжается еще некоторое время с постепенно уменьшающейся скоростью.

В настоящей работе мы исследовали формирование массивов нанокластеров серебра и золота на ненагретой поверхности аморфного углерода методом вакуум-термического испарения малых количеств вещества для выявления закономерностей этого процесса.

2. Методика эксперимента

Исследуемые массивы кластеров серебра и золота формировались методом вакуум-термического испарения и конденсации малых навесок вещества с молибденового испарителя при расстоянии от испарителя до подложки 20 см. Предварительно были проведены эксперименты по определению толщины более толстых слоев серебра и золота из навесок массой 100–500 mg. Толщина слоев измерялась методом атомной силовой мик-

роскопии. По результатам измерений были построены калибровочные зависимости толщины пленки серебра и золота от массы навесок. Для определения величины навесок, необходимых для формирования пленок металлов толщиной в несколько нанометров, калибровочные зависимости были экстраполированы в соответствующую область малых толщин. Согласно полученным данным, для формирования тонкой пленки металла толщиной 1 nm были необходимы навески серебра 0.9 mg и золота 1.5 mg. Следует отметить, что при испарении столь малых количеств серебра и золота конденсат сразу представляет собой массив кластеров, поэтому в диапазоне толщин 1–10 nm указываемые нами толщины пленок являются гипотетическими, т.е. полученными в результате экстраполяции.

Были изготовлены две серии образцов для просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Подготовка образцов проходила в несколько стадий. На начальной стадии на монокристаллическую соль KCl методом магнетронного распыления был нанесен слой аморфного углерода толщиной 20 nm. Следующей стадией было нанесение металла методом вакуум-термического испарения: на первую серию образцов испаряли серебро из различных навесок в диапазоне 0.6–8 mg; на вторую — золото из навесок в диапазоне 2–11 mg.

Далее образцы были подвергнуты отжигу в вакууме при температуре 350°C в течение 30 min.

На последней стадии подготовки образцы погружались в деионизованную воду для растворения KCl. Тогда тонкая пленка аморфного углерода с массивом кластеров металла всплывала на поверхность и вылавливалась на стандартную медную сетку для ПЭМ.

Полученные образцы исследовались с использованием просвечивающего электронного микроскопа FEI Tecnai G² 20 S-Twin, оснащенного приставкой для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа EDAX.

Еще одна серия образцов с массивами золота, полученными в тех же процессах нанесения, была получена на подложке Si, покрытой термическим SiO₂. Образцы этой серии были подвергнуты отжигу в вакууме в диапазоне температур 150–350°C в течение 30 min и изучены с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).

3. Результаты

Исследование образцов обеих серий, и с золотом, и с серебром, показало однотипную заметную зависимость размера частиц и плотности их расположения на поверхности от количества испаренного металла (от гипотетической толщины пленки металла). Рис. 1 демонстрирует ПЭМ-фотографии массивов кластеров второй серии образцов, полученных при испарении навесок золота различной массы. Как можно видеть на соответствующих гистограммах распределения частиц по размерам, при испарении навески ~ 2 mg (соответствующая расчетная гипотетическая толщина пленки 1.3 nm) преобладает

размер кластеров ~ 9 nm (рис. 1, *a*), в то время как при испарении более крупной навески ~ 11 mg (гипотетическая толщина пленки 7 nm) преобладает размер ~ 35 nm (рис. 1, *d*). Подобное явление наблюдалось и в других работах [24,26,27,39].

Можно выделить некоторые особенности этого явления, которые являются необычными с точки зрения классического механизма конденсации тонких пленок:

— при испарении и конденсации очень малых количеств серебра или золота образуется большое количество очень мелких кластеров (рис. 1, *a*). С увеличением массы навески размер кластеров увеличивается, а их количество на единице площади уменьшается (рис. 1, *b–d*);

— для всех образцов с гипотетической толщиной 1–10 nm наблюдается унимодалный характер распределения частиц по размерам. Отклонения начинаются для толщин свыше 10 nm. Это связано с тем, что при осаждении таких количеств вещества помимо процесса конденсации возникает еще один процесс — коалесценция кластеров в более крупные. К тому же в результате форма частиц становится сильно вытянутой, несферической, и возникает ошибка в определении размеров таких кластеров.

Экспериментальные зависимости на рис. 2 показывают, что плотность расположения частиц на единице площади поверхности экспоненциально снижается с увеличением гипотетической толщины пленки, т.е. с увеличением массы навески, в то время как преобладающий размер частиц в массиве увеличивается линейно с увеличением гипотетической толщины пленки. Причем это наблюдается как для серебра, так и для золота. Обращает на себя внимание также то обстоятельство, что зависимости преобладающего размера частиц серебра и золота от виртуальной толщины пленки очень близки.

Принимая во внимание случай на рис. 1, *a*, соответствующий малым количествам испаренного вещества, можно заключить, что при испарении более крупных навесок процесс роста кластеров также должен проходить такую стадию, когда образуется большое множество очень мелких кластеров. Тогда возникают закономерные вопросы, что дальше происходит с этими мелкими кластерами и как образуются более крупные кластеры? Одно из первых предположений — это уже упомянутый процесс коалесценции кластеров в более крупные. Однако если бы этот процесс имел место на этой стадии, при увеличении количества испаренного вещества мы видели бы на соответствующих рис. 1, *b–c* различные фрагменты слияния кластеров друг с другом. Но мы видим, что в большинстве случаев кластеры вообще сепарированы друг от друга. В связи с этим мы более детально исследовали пространство между крупными частицами.

Было обнаружено, что между крупными частицами серебра присутствуют очень мелкие кластеры размером ~ 2–3 nm: на рис. 3 приведено ПЭМ-изображение фрагмента поверхности между крупными кластерами,

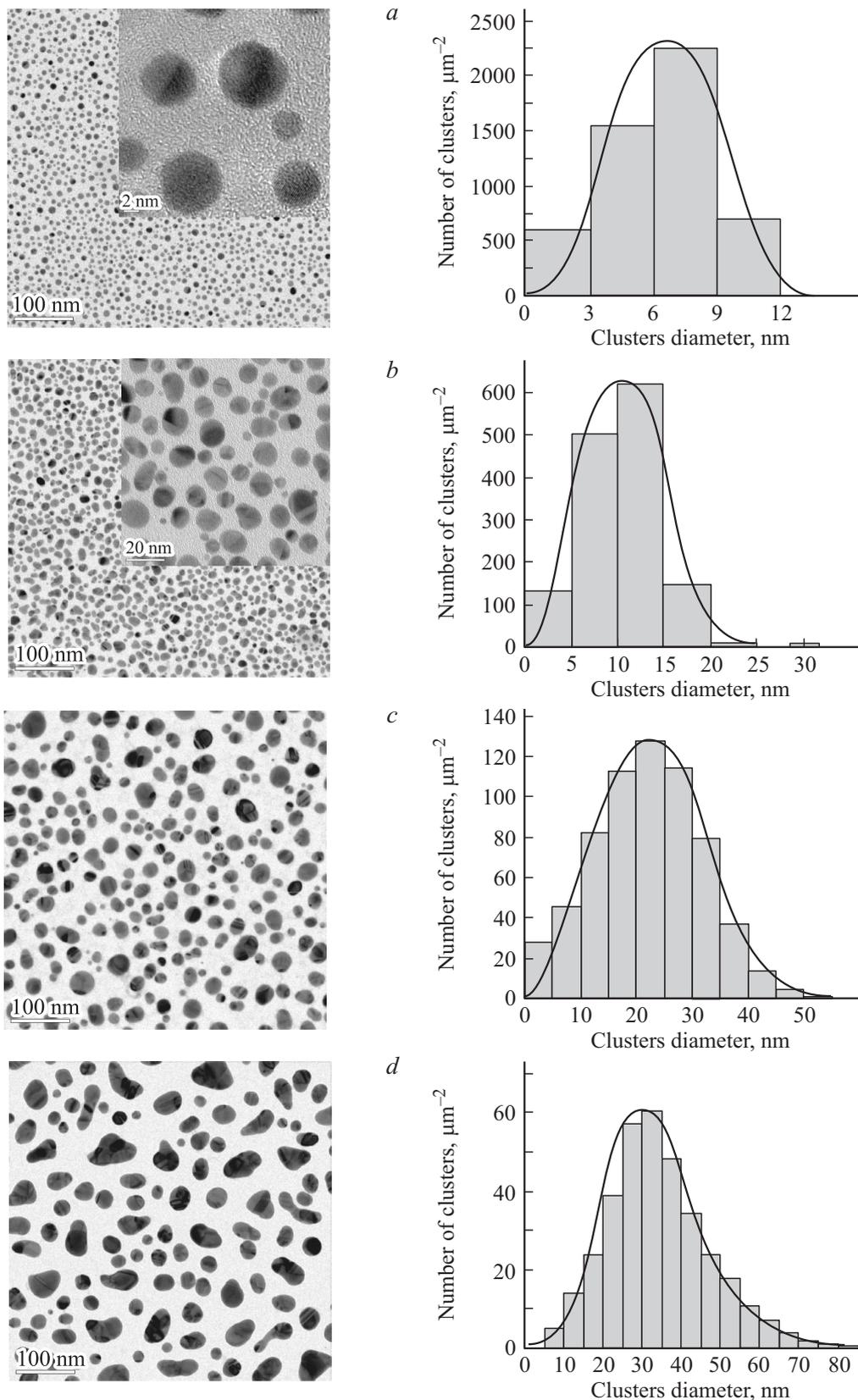


Рис. 1. ПЭМ-изображения и гистограммы распределения по диаметру кластеров Au на поверхности аморфного углерода после отжига при 350°C в течение 60 min для гипотетических толщин пленки 1.3 (a), 2.7 (b), 4.8(c), 7.0 nm (d).

на котором видны четыре кристаллических образования. На врезке к рисунку приведен Фурье-образ одного из этих нанокластеров, на котором четко различаются 6 максимумов. Для сравнения на той же врезке показан отрезок, длина которого соответствует расстоянию между кристаллическими плоскостями серебра $\{111\}$: $d = 2.36 \text{ nm}$. Длина отрезка практически совпадает с расстоянием между максимумами. Это позволяет сделать вывод, что данные образования представляют собой монокристаллические нанокластеры серебра. Следует отметить, что количество этих кластеров заметно меньше, чем в случае испарения меньших навесок вещества. Таким образом, данное исследование позволяет выделить еще одну особенность процесса конденсации при испарении малых количеств серебра и золота: при испарении и конденсации более крупных навесок детальное исследование пространства между крупными частицами обнаруживает между ними очень мелкие частицы. Однако плотность их расположения на единице площади (рис. 1, *d*) много меньше, чем в случае испарения и конденсации очень малых количеств вещества (рис. 1, *a*).

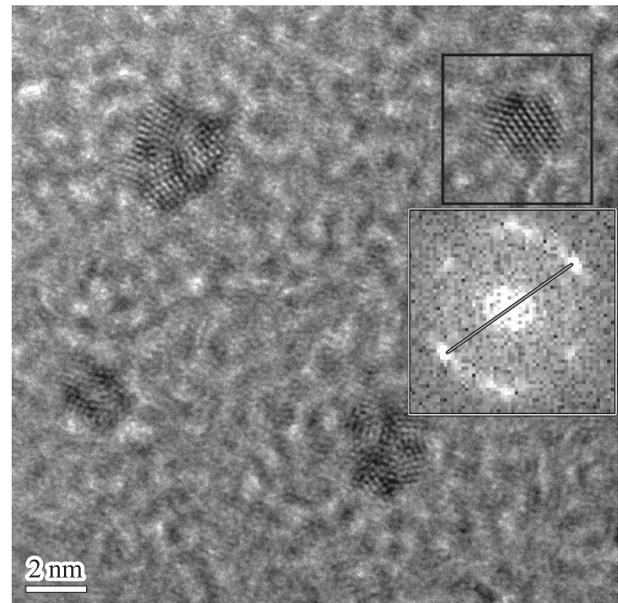


Рис. 3. Высокорастворяющее ПЭМ-изображение фрагмента поверхности между крупными кластерами образца с гипотетической толщиной пленки Ag 17 nm. На вставке — Фурье-образ области поверхности, выделенной черным квадратом.

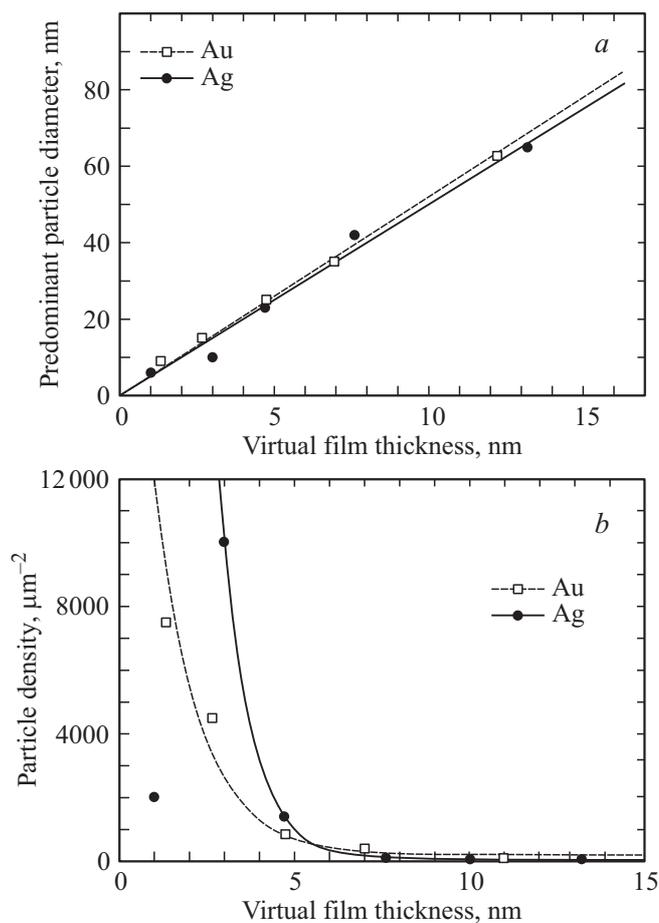


Рис. 2. Экспериментальные зависимости преобладающего диаметра кластеров (*a*) и плотности расположения частиц на поверхности аморфного углерода (*b*) от гипотетической толщины пленки Ag и Au.

Изучение методом РЭМ серии образцов с массивами кластеров золота на поверхности окисленной кремниевой подложки после вакуумного отжига в диапазоне температур 150–350°C показало, что заметных изменений в преобладающем размере кластеров в массиве и плотности их расположения на поверхности не наблюдается. В частности, преобладающий диаметр кластеров золота в массиве, полученном испарением из навесок 2.1 и 4.2 mg, оказался 10 и 15 nm соответственно. После отжига этих образцов при 150, 200, 250, 300 и 350°C в течение 30 min преобладающий диаметр кластеров золота в массиве так и остался 10 и 15 nm соответственно. Более того, в некоторых случаях в исходных образцах наблюдалась агрегация кластеров в скопления. Однако отжиг в указанном диапазоне температур приводит к полному сепарированию кластеров друг от друга, что было наглядно продемонстрировано в [31]. Это позволяет констатировать, что при низких температурах отжига массивов кластеров золота и серебра (по меньшей мере, до 350°C) процесс коалесценции кластеров в более крупные отсутствует, и, напротив, наблюдается разделение кластеров в массиве.

Чтобы разобраться с тем, как происходит процесс укрупнения кластеров, мы подготовили еще один образец для ПЭМ, и провели дополнительный эксперимент. Мы последовательно осадил серебро из навески 5 mg (соответствующая гипотетическая толщина пленки серебра $\sim 8 \text{ nm}$), отожгли образец при 230°C в течение 15 min, снова осадил серебро на него же, теперь из навески 2.5 nm (соответствующая гипотетическая толщина пленки серебра $\sim 4 \text{ nm}$), и снова отожгли образец

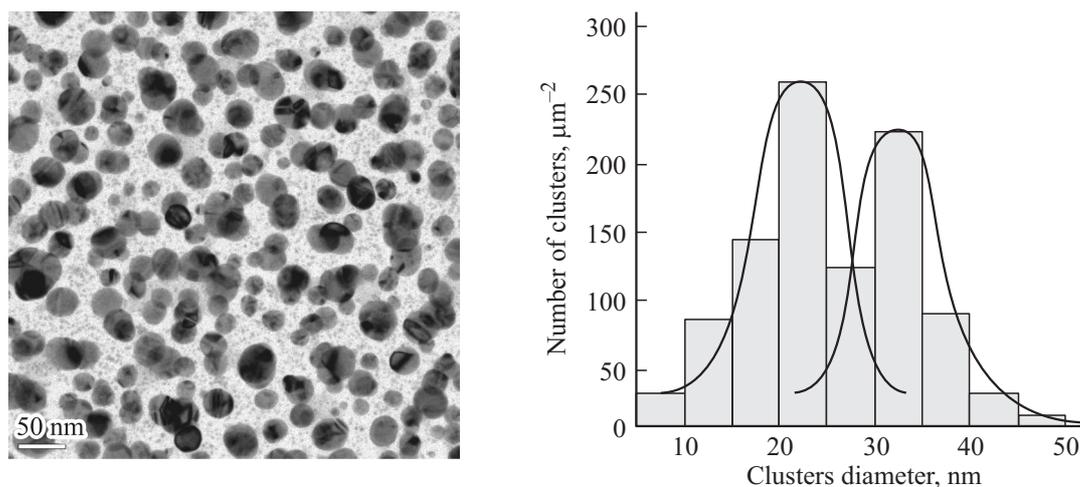


Рис. 4. ПЭМ-изображение и гистограмма распределения по диаметру кластеров Ag на поверхности аморфного углерода образца, на который были последовательно конденсированы и отожжены при 230°C в течение 15 min слои Ag из навесок 5 и 2.5 mg.

при 230°C в течение 15 min. На рис. 4 представлены ПЭМ-изображение массива кластеров и распределение кластеров по размерам, полученное с этого изображения. Как можно видеть, полученное распределение стало иметь бимодальный характер: выявились два предпочтительных размера кластеров: 25 и 35 nm. Полученные значения достаточно хорошо располагаются на зависимости на рис. 2, а для указанных гипотетических толщин серебра 4 и 8 nm. Результат, демонстрируемый рис. 4, выявляет следующую особенность: конденсирующийся пар серебра формирует новые кластеры, при этом старые кластеры практически не растут.

4. Дискуссия

В соответствии с законом Менделеева–Клапейрона расширение газа может сопровождаться снижением давления и увеличением температуры. Следует обратить внимание, что если ожидать понижения температуры газа, то это должно сопровождаться дополнительным снижением давления, что вряд ли возможно в нашем рассматриваемом случае. При испарении вещества из точечного источника в вакууме направления движения испаренных атомов расходятся. Столкновения между атомами маловероятны, учитывая, что концентрация их в вакууме мала, и, следовательно, обмен энергией между ними также маловероятен. Все это указывает на то, что испаренные атомы сохраняют высокую температуру, полученную при испарении. В случае, например, испарения серебра следует ожидать, что температура испаренных атомов соответствует температуре испарения серебра и составляет ~ 1300 K. Используя известное выражение для среднеквадратичной скорости молекулы идеального газа, несложно вычислить, что скорость движения испаренного атома серебра при температуре 1300 K будет составлять ~ 500 m/s.

Отмеченная выше особенность, что процесс коалесценции кластеров в более крупные отсутствует при температурах отжига массивов кластеров золота и серебра по меньшей мере до 623 K, указывает на недостаточность этой температуры для начала процесса коалесценции. В то же время мы видим, что коалесценция происходит при испарении крупных навесок серебра, т.е. при продолжительном воздействии пара серебра на поверхность. Это означает, что поверхность осаждения при конденсации серебра нагревается выше, чем 623 K. Коалесценцию наблюдали при распаде тонкой пленки серебра на капли при температуре образца 930 K [30,31].

Таким образом, поверхность осаждения подвергается воздействию направленного потока горячего пара, хотя и разреженного. Это не может не нагревать ее. Однако подложка у нас изначально не была нагрета, поэтому тепло, нагревающее поверхность, отводится в глубь подложки. Средний размер кластеров в массиве в зависимости от массы испаряемой навески определяется соотношением подведенного и отведенного тепла.

Общепринятой точкой зрения является то, что зародыши новой фазы на поверхности твердого тела при физической конденсации из газовой фазы образуются и растут в результате адсорбции и последующей миграции атомов по поверхности [32]. Однако комплекс выделенных выше особенностей процесса конденсации позволяет заключить, что данное утверждение лишь частично объясняет существующие и представленные здесь экспериментальные наблюдения. Существенную роль здесь также играет непосредственно газовая фаза. Важный результат, представленный на рис. 4, показывает, что разрастания предварительно сформированных (т.е. старых) зародышей практически не происходит. Более того, в основном происходит образование новых зародышей, и в процессе продолжающейся конденсации продолжают заметный рост только новые зародыши.

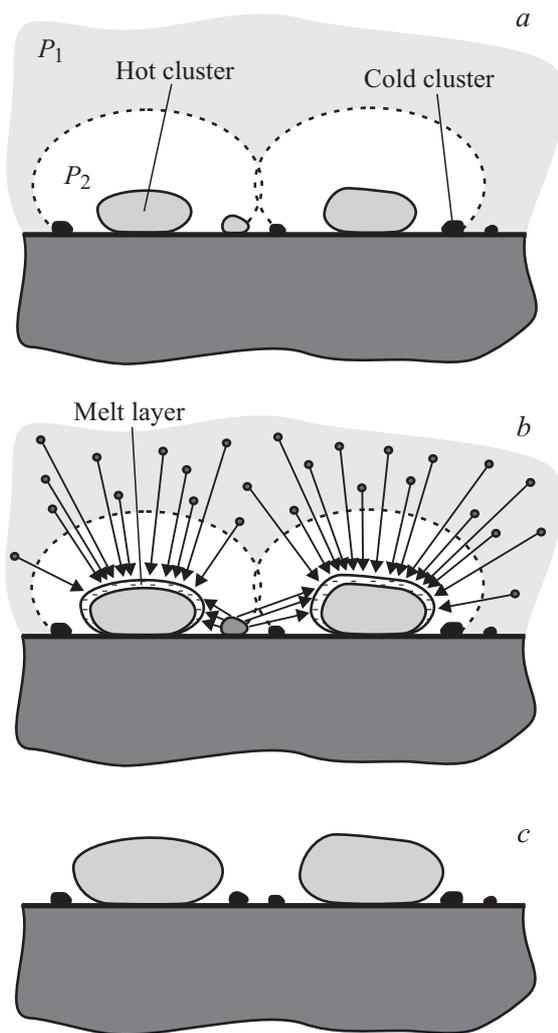


Рис. 5. Схема механизма зарождения и роста кластеров Ag на твердофазной поверхности из газовой фазы, сформированной испарением в вакууме: *a* — начальная стадия; *b* — промежуточная стадия; *c* — конечная стадия.

Данное экспериментальное наблюдение вместе с вышесказанным позволяет заключить, что к дальнейшему росту способны только горячие зародыши.

Объединить все отмеченные здесь экспериментальные особенности процесса испарения и физической конденсации вещества из газовой фазы можно следующим феноменологическим описанием, которое поясняет рис. 5.

Учитывая высокую скорость движения испаренных атомов Ag, нетрудно оценить, что при мгновенном испарении навески серебра, например 1.8 mg, давление пара серебра P_1 в сфере радиусом 20 см, соответствующим нашему расстоянию от испарителя до подложки, будет ~ 0.08 Торр.

Когда продолжительность воздействия горячего пара на исходно холодную поверхность осаждения невелика, сконденсировавшиеся атомы Ag очень быстро отдают свою энергию холодной поверхности и поэтому имеют очень ограниченную возможность миграции по поверх-

ности. В этой связи понятен экспериментальный результат, который мы видим на рис. 1, *a*, когда образуется огромное множество очень мелких кластеров серебра. Низкий коэффициент прилипания на этом этапе осаждения (0.1–0.2 [24,26]) объясняется тем, что изначальная холодная поверхность — твердая и упругая, и атом серебра, имеющий температуру 1300 К и скорость движения 500 м/с, при ударе о такую поверхность заметно чаще (в 80% случаев) не конденсируется, а упруго отражается от нее.

Образование зародышей Ag на поверхности подложки вызывает потребление атомов серебра из газовой фазы и снижение давления атомов Ag до некоторого значения P_2 вблизи поверхности зародыша (рис. 5, *a*). Если предположить мгновенное образование самого маленького из того, что мы наблюдаем, зародыша серебра диаметром 2 нм, то нетрудно посчитать, что для той же испаренной навески в 1 mg это означает, что все атомы серебра должны быть потреблены из газовой фазы с объема вокруг кластера $0.7 \mu\text{m}^3$. Таким образом, потребление атомов серебра из пара на формирование кластера приводит к возникновению градиента давления $\Delta P = P_1 - P_2$ между объемом газовой фазы и приповерхностной областью кластера. В вакуумной технике хорошо известен так называемый геттерный эффект, суть которого состоит в откачивающем действии, вызванном поглощением газов свежесоздаваемой пленкой. Важно, что при этом возникает перепад давления между приповерхностной областью пленки и объемом вакуумной камеры, вызывая направленное движение молекул в сторону пленки. Таким образом, наличие градиента давления ΔP между объемом газовой фазы и приповерхностной областью кластера приводит к возникновению направленного потока атомов серебра из пара к кластеру серебра, обеспечивающего дальнейший рост этого кластера (рис. 5, *b*). Направленное воздействие горячего пара на кластер разогревает его. Учитывая высокую температуру пара Ag, направленного на кластер, можно ожидать, что кластер разогревается до возникновения гетерогенного плавления и образования на его поверхности жидкого слоя [40]. Это объясняет, почему с увеличением продолжительности осаждения (т.е. количества испаренного вещества) коэффициент прилипания постепенно увеличивается. По мере увеличения толщины жидкого слоя поверхность кластера становится менее упругой, в результате чего атомы пара серебра уже неупруго соударяются с такой поверхностью и конденсируются на ней, выделяя свое тепло.

Из-за возникновения направленного потока атомов пара серебра в сторону горячих кластеров атомы пара серебра перестают ударяться о поверхность осаждения, свободную от кластеров, что снижает вероятность образования новых кластеров между кластерами, продолжаящими рост. Поскольку потребления атомов пара не происходит на поверхности холодных кластеров, поток атомов пара серебра не направлен также в сторону существующих холодных кластеров. Более того, низкое

давление пара над крупными горячими кластерами вызывает испарение атомов с поверхности более мелких горячих кластеров, что приводит к постепенному их испарению (рис. 5, *b*). Данное явление сопровождается поглощением тепла, что приводит к постепенному охлаждению таких кластеров. Таким образом, при растущих крупных кластерах более мелкие кластеры либо полностью испаряются, либо остаются очень мелкими, если они остыли (рис. 5, *c*). Это объясняет наше наблюдение, что при увеличении испаряемой навески кластеры укрупняются и плотность их уменьшается, но между ними остается какое-то небольшое количество очень мелких кластеров.

5. Заключение

Таким образом, наше исследование зарождения и роста массивов частиц золота и серебра на поверхности аморфного углерода показало, что газовая фаза играет заметную роль в этих процессах. В частности, важно следующее.

Поток пара конденсирующихся атомов Ag или Au является горячим;

Когда происходит зарождение частицы Ag или Au на поверхности, возникает поток парообразного Ag или Au, направленный на эту частицу. Этот поток поддерживает ее в горячем состоянии и обуславливает ее рост.

При этом пространство между растущими частицами Ag или Au не бомбардируется горячим паром, что приводит к испарению и остыванию мелких кластеров между более крупными.

Тепло пара, выделяемое при конденсации, удаляется с поверхности в глубину подложки.

Список литературы

- [1] Y. Ohta, Y. Okamoto, S. Irie, K. Morokuma. *ACS Nano* **2**, 1437 (2008).
- [2] H. Shiozawa, T. Pichler, A. Grüneis, R. Pfeiffer, H. Kuzmany, Z. Liu, K. Suenaga, H. Kataura. *Adv. Mater.* **20**, 1443 (2008).
- [3] D. Ciuparu, Y. Chen, S. Lim, Y. Yang, G.L. Haller, L. Pfeifferle. *J. Phys. Chem. B* **108**, 15 565 (2004).
- [4] J. Robertson. *J. Mater. Chem.* **22**, 19 858 (2012).
- [5] D.E. Perea, N. Li, R.M. Dickerson, A. Misra, S.T. Picraux. *Nano Lett.* **11**, 3117 (2011).
- [6] T. Ghoshal, S. Biswas, S. Kar. *J. Phys. Chem. C* **112**, 20 138 (2008).
- [7] J.E. Allen, E.R. Hemesath, D.E. Perea, J.L. Lensch-Falk, Z.Y. Li, F. Yin, M.H. Gass, L.J. Lauhon. *Nature Nanotech.* **3**, 168 (2008).
- [8] M.T. Borgström, G. Immink, B. Ketelaars, R. Algra, E.P.A.M. Bakkers. *Nature Nanotech.* **2**, 541 (2007).
- [9] G. Prieto, J. Zečević, H. Friedrich, K.P. De Jong, P.E. De Jongh. *Nature Mater.* **12**, 34 (2013).
- [10] T. Takei, T. Akita, I. Nakamura, T. Fujitani, M. Okumura, K. Okazaki, J. Huang, T. Ishida, M. Haruta. *Adv. Catal.* **55**, 1 (2012).
- [11] M. Sanles-Sobrido, W. Exner, L. Rodríguez-Lorenzo, B. Rodríguez-González, M.A. Correa-Duarte, R.A. Álvarez-Puebla, L.M. Liz-Marzan. *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 2699 (2009).
- [12] C. Shen, C. Hui, T. Yang, C. Xiao, J. Tian, L. Bao, S. Chen, H. Ding, H. Gao. *Chem. Mater.* **20**, 6939 (2008).
- [13] M.F. Kircher, A. De La Zerda, J.V. Jokerst, C.L. Zavaleta, P.J. Kempen, E. Mittra, K. Pitter, R. Huang, C. Campos, F. Habte, R. Sinclair, C.W. Brennan, I.K. Melinghoff, E.C. Holland, S.S. Gambhir. *Nat. Med.* **18**, 829 (2012).
- [14] D.O. Lapotko, E. Lukianova, A.A. Oraevsky. *Lasers Surg. Med.* **38**, 631 (2006).
- [15] Chang-Po Hsiung, Hsin-Wei Liao, Jon-Yiew Gan, Tai-Bo Wu, Jenn-Chang Hwang, Frederick Chen, Ming-Jinn Tsai. *ACS Nano* **4**, 5414 (2010).
- [16] Jin Hyung Jun, Kyoungah Cho, Jungwon Yun, Sangsig Kim. *J. Mater. Sci.* **46**, 6767 (2011).
- [17] N.J. Lee, B.H. An, A.Y. Koo, H.M. Ji, J.W. Cho, Y.J. Choi, Y.K. Kim, C.J. Kang. *Appl. Phys. A* **102**, 897 (2011).
- [18] S. Zhan, X. Hu, J. Fan, Q. Zhang, R. Ji, Y. Wang, T. Miao, X. Sun, Y. Hao. *Technical Proceedings of the 2013 NSTI Nanotechnology Conference and Expo, NSTI-Nanotech* **1**, 77 (2013).
- [19] Z. Starowicz, M. Lipiński, K. Berent, R. Socha, K. Szczepanowicz, T. Kruk. *Plasmonics* **8**, 41 (2013).
- [20] Y. Wang, N. Chen, X. Zhang, X. Yang, Y. Bai, M. Cui, Y. Wang, X. Chen, T. Huang. *J. Semicond.* **30**, 072 005 (2009).
- [21] N.G. Khlebtsov. *J. Quant. Spectro Rad. Trans.* **123**, 184 (2013).
- [22] N.C. Lindquist, P. Nagpal, K.M. McPeak, D.J. Norris, S.-H. Oh. *Rep. Prog. Phys.* **75**, 036 501 (2012).
- [23] J.Z. Zhang, C. Noguez. *Plasmonics* **3**, 127 (2008).
- [24] J.F. Hamilton, P.C. Logel. *Thin Solid Films* **16**, 49 (1973).
- [25] I.M. Goldby, L. Kuipers, B. von Issendorff, R.E. Palmer. *Appl. Phys.* **69**, 2819 (1996).
- [26] A.A. Schmidt, H. Eggers, K. Herwig, R. Anton. *Surf. Sci.* **349**, 301 (1996).
- [27] J. Carrey, J.-L. Maurice, F. Petroff, A. Vaures. *Surf. Sci.* **504**, 75 (2002).
- [28] C. Gatel, E. Snoeck. *Surf. Sci.* **600**, 2650 (2006).
- [29] M. Sui, M.-Y. Li, E.-S. Kim, J. Lee. *Nanoscale Res. Lett.* **8**, 525 (2013).
- [30] Д.Г. Громов, О.В. Пятилова, С.В. Булярский, А.Н. Белов, А.А. Раскин. *ФТТ* **55**, 562 (2013).
- [31] A.N. Belov, S.V. Bulyarsky, D.G. Gromov, L.M. Pavlova, O.V. Pyatilova. *Calphad* **44**, 138 (2014).
- [32] L.I. Maissel, R. Glang. *Handbook of thin film technology*. McGraw-Hill, NY (1970). 800 p.
- [33] J.P. Hirth, G.M. Pound. *Condensation and Evaporation*. The Macmillan Company, NY (1963). 191 p.
- [34] R.A. Sigsbee, G.M. Pound. *Adv. Coll. Interf. Sci.* **1**, 335 (1967).
- [35] D. Walton. *J. Chem. Phys.* **37**, 2181 (1962).
- [36] D. Walton. *Phil. Mag.* **7**, 1671 (1962).
- [37] T. Rhodin, D. Walton. *Single Crystal Films*. Eds / M.N. Francombe, H. Sato. Pergamon Press, NY (1964). P. 31.
- [38] D.W. Oxtoby, R. Evans. *J. Chem. Phys.* **89**, 7521 (1988).
- [39] C. Revenant, G. Renaud, R. Lazzari, J. Jupille. *Phys. Rev. B* **79**, 235 424 (2009).
- [40] Д.Г. Громов, С.А. Гаврилов. *ФТТ* **51**, 2012 (2009).