

06

Формирование наноалмазных пленок из водных суспензий по технологии центрифугирования

© П.В. Лебедев-Степанов,^{1,4} С.П. Молчанов,¹ А.Л. Васильев,² В.П. Митрохин,¹
Г.А. Юрасик,¹ А.Е. Алексенский,³ А.Т. Дидейкин³

¹ Центр фотохимии РАН,
119421 Москва, Россия

² Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

³ Физико-технический институт им.А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
119421 Москва, Россия
email: petrls@mail.ru

(Поступило в Редакцию 21 января 2015 г.)

Исследованы процессы формирования многофункциональных упорядоченных массивов из частиц детонационных наноалмазов в ходе самосборки при центробежном нанесении пленок (технология центрифугирования, spin-coating) из испаряющихся микрокапель. Показано, что наиболее однородный слой алмазных наночастиц на подложке из кристаллического кремния сформирован при скоростях вращения около 8000 min^{-1} , тогда как при скоростях порядка 2000 min^{-1} отчетливо наблюдается зависимость распределения частиц от радиуса. При увеличении скорости вращения подложки от 2500 до 8000 min^{-1} плотность покрытия кремниевой подложки наночастицами уменьшается примерно в 3 раза. Предложена оценочная модель, позволяющая оценить возрастание числа отдельно стоящих алмазных „точек“ при увеличении частоты вращения подложки.

Введение

Углеродные наноматериалы, в том числе детонационные наноалмазы (ДНА), обладают уникальными оптическими, электронными и механическими свойствами, однако их применение в ряде случаев требует разработки методов получения тонких слоев заданной морфологии. При этом результаты систематического исследования способов получения тонких слоев ДНА по технологии центрифугирования в научной литературе отсутствуют.

Частицы ДНА образуются из атомов углерода, входящих в состав смеси взрывчатых веществ в неокислительной среде (жидкой или газообразной) с отрицательным кислородным балансом. Такая смесь, взорванная в специальной камере ($P \geq 10 \text{ GPa}$, $T \geq 3000 \text{ K}$), образует детонационную сажу, содержащую до 75% алмаза и примеси, основными компонентами которых являются неалмазный углерод и металлы [1–4]. На поверхности частиц ДНА имеются различные функциональные группы, характер и поверхностная плотность которых зависят от конкретной процедуры жидкофазной или газофазной очистки примесей от неалмазного углерода и металлов с использованием сильных окислителей. Методами инфракрасной и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [5–9] было показано наличие на поверхности ДНА кислородсодержащих карбонильных ($=C=O$), эфироподобных ($\equiv C-O-C \equiv$), гидроксильных ($\equiv C-OH$), карбоксильных ($-COOH$) и аминогрупп ($\equiv C-NH_2$). Реакции взаимодействия таких групп с водными растворами электролитов приводят к разделению

электрических зарядов и образованию двойного электрического слоя на границе фаз, что является причиной различных электроповерхностных явлений, наблюдаемых в гидрозолях ДНА.

Получение упорядоченных массивов наноалмазов открывает привлекательные возможности создания ряда структур, интересных с практической точки зрения, в том числе автоэлектронных катодов. Внешние электрические поля, необходимые для полевой эмиссии в этих структурах, малы по сравнению с полями, необходимыми для полевой эмиссии из металлов. Именно поэтому такие системы интенсивно исследуются для создания нового поколения вакуумной электроники, однако эти возможности могут быть реализованы только при разработке воспроизводимой технологии получения упорядоченных массивов наноалмазных точек на различных подложках.

Наиболее простым и эффективным методом формирования подобных массивов представляется испарение водных суспензий частиц ДНА на поверхности проводящих подложек. Однако неоднородность получаемых слоев, связанная с образованием отдельных капель в процессе испарения водных суспензий [10], создает значительные препятствия при использовании этого метода.

Использование метода центрифугирования позволяет решить указанные проблемы, поскольку создает возможность наиболее точно контролировать время испарения, а значит и процессы формирования морфологии пленки и ее толщину [10,11]. С этим связана перспективность применения этого метода, что диктует необходимость изучения процессов самоорганизации

наноструктур в формирующихся пленках. Последнее представляет самостоятельный интерес для создания физических и компьютерных моделей взаимодействия наночастиц в испаряющемся растворе [12].

В настоящей работе исследованы принципы формирования упорядоченных массивов из кластерных наноструктур ДНА при самосборке в тонких пленках испаряющихся коллоидных растворов с использованием технологии центрифугирования в зависимости от скорости вращения подложки, количества циклов нанесения и других определяющих факторов. Показана возможность воспроизводимым образом получать заданную морфологию тонкопленочных образцов на гладкой подложке.

1. Образцы и методика экспериментов

Нанесение пленки коллоидного раствора производилось методом центрифугирования на установке Spincoater P6700 производства Specialty Coating Systems (США) с модулем расширения Dispenser D6004, позволяющей получать однослойные и многослойные пленки толщиной от сотых долей микрона. Благодаря синхронизации модуля нанесения раствора и центрифуги, скорость вращения которой составляет от 100 до 8000 оборотов в минуту, а время разгона в зависимости от требований технологического процесса может быть выбрано от 1 до 30 s, можно программировать сложные многоступенчатые процессы и получать пленки с заданными параметрами.

Исследования всех образцов проводились в растровом электронно-ионном микроскопе (РЭИМ) Helios 600 (FEI company, США) при ускоряющем напряжении 2–30 kV в режиме растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием детекторов вторичных электронов. При подсчете относительной площади покрытия подложки частицами ДНА было использовано программное обеспечение ImageJ. Кроме этого, отдельные частицы ДНА были изучены методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в просвечивающем/растровом электронном микроскопе (П/РЭМ) TITAN 80-300 TEM/STEM (FEI, США) с ускоряющим напряжением 300 kV, оборудованным корректором сферической аберрации, высокоугловым кольцевым темнопольным детектором (ВУКТПД) (Fischione, США), анализатором характеристических потерь энергии электронов (GIF, Gatan, США) и системой ЭДРМА (EDAX, США).

Исходный коллоидный раствор ДНА в деионизированной воде представлял собой темно-коричневую жидкость с концентрацией частиц — 0.38 wt.%; средний размер частиц, определенный методом динамического светорассеяния, составлял 4.0 nm; размер области когерентного рассеяния, определенный методом рентгеновской дифракции — 4.5 nm; дзета-потенциал — 45 mV (отрицательный). Использовалась суспензия ДНА, приготовленная в лаборатории „Физики кластерных структур“ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Исходным материалом

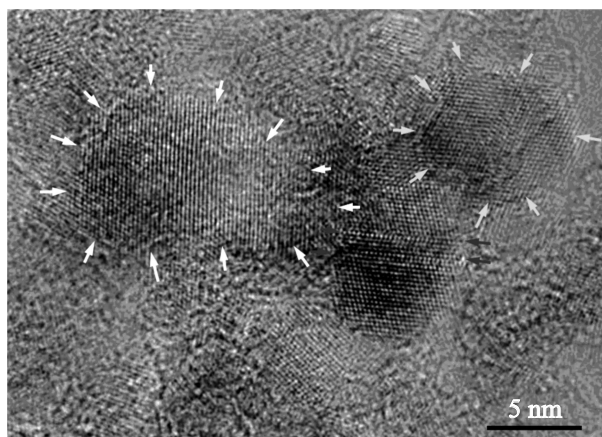


Рис. 1. ВРПЭМ изображения наночастиц ДНА. Стрелками показаны отдельные кристаллиты.

для приготовления суспензии служил порошок ДНА промышленного синтеза, (СКТБ „Технолог“ (СПб) или ООО „Синта“ (Беларуссия)).

Для исследования методом ПЭМ раствор ДНА наносился центрифугированием на стандартные медные сетки, покрытые ультратонким слоем аморфного углерода.

Изображения пленки ДНА на подложке с атомным упорядочением, полученные методом просвечивающей микроскопии высокого разрешения (ВРПЭМ), представлены на рис. 1. Часть частиц находится в кристаллографической ориентации, близкой к низкоиндексным осям зон, и это дает возможность наблюдать изображение кристаллической решетки и более точно определять форму и размеры ДНА. В некоторых случаях кристаллическая решетка частиц ДНА расположена в ориентации, близкой к оси зоны $B = [011]$, как это представлено на рис. 1, где отдельные частицы выделены стрелками. Размер кристаллитов, определенных по рис. 1 и подобным изображениям, составил 3–10 nm. В отдельных частицах, наблюдаются двойники, которые отчетливо видны при ориентации кристаллической решетки алмаза $B = [011]$. Двойникование способно изменять форму частиц с округлой на вытянутую или более сложную, что, безусловно, может ограничивать вероятность реализации самосборки и упорядочения при формировании пленок из частиц ДНА.

Таблица 1. Описание образцов, полученных методом центрифугирования на подложке Si

	Скорость вращения, min^{-1}						
	0	2500	5000	8000			
Количество циклов нанесения	1	1	1	1	2	3	5
Номер образца	51-2	52-2	53-2	54-2			
				62	63	65	66

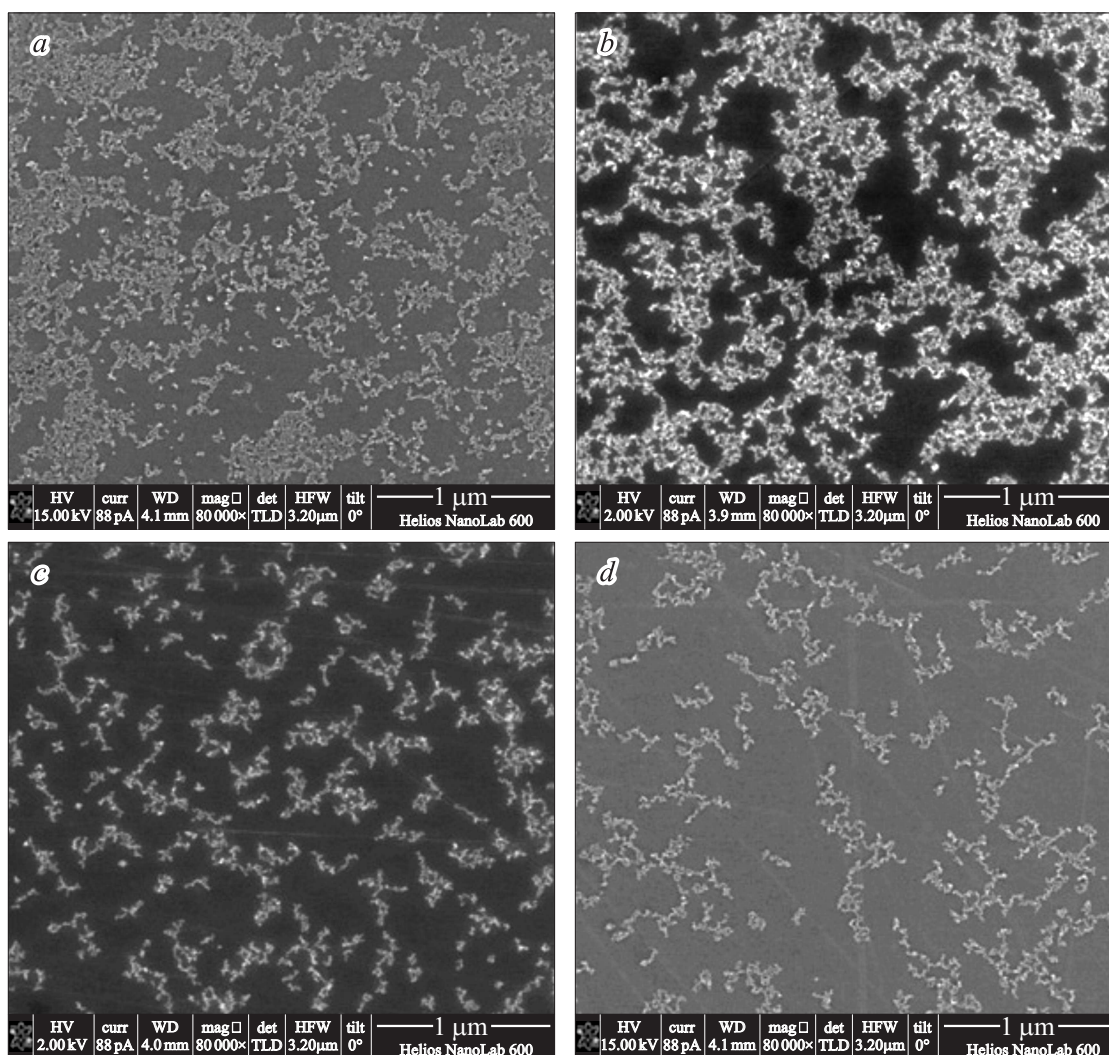


Рис. 2. РЭМ изображения образцов пленок: *a* — 51-2 (0 min^{-1}), *b* — 52-2 (2500 min^{-1}), *c* — 53-2 (5000 min^{-1}), и *d* — 54-2 (8000 min^{-1}).

Были получены и исследованы пленки ДНА на подложке Si с атомным упорядочением, нанесенные при различных скоростях вращения подложки с разной скоростью центрифугирования. При нанесении слоев была исследована зависимость морфологии пленки от скорости вращения подложки и от расстояния от ее центра. Также для образцов, полученных при нанесении со скоростью вращения 8000 min^{-1} , была исследована зависимость толщины покрытия от количества циклов нанесения. Параметры образцов представлены в табл. 1.

Измеренный спектр оптического пропускания раствора ДНА соответствует данным, приведенным в работе [13].

2. Результаты и обсуждение

Для исследования зависимости относительной площади покрытия подложки Si алмазными частицами от скорости вращения было выбрано 4 образца (табл. 1):

51-2, 52-2, 53-2, 54-2, полученных при скоростях 0, 2500, 5000 и 8000 min^{-1} соответственно. Изображения пленок, полученных методом РЭМ с различным увеличением, представлены на рис. 2, а относительная площадь покрытия в табл. 2.

На РЭМ изображениях, представленных на рис. 2, видны кластеры, образованные отдельными кристаллитами ДНА, общий вид которых представлен на рис. 1. При этом кластеризация в значительной степени происходит в процессе испарения растворителя, так что с ростом скорости вращения подложки (и сокращением времени испарения в связи с утончением слоя удерживаемого на подложке раствора) размер кластеров заметно уменьшается. Это объясняется тем, что скорость образования кластеров соизмерима со скоростью испарения пленки раствора на вращающейся подложке.

Для исследования зависимости площади покрытия алмазными частицами подложки Si от расстояния до центра вращения были выбраны образцы 52-2 и 53-2.

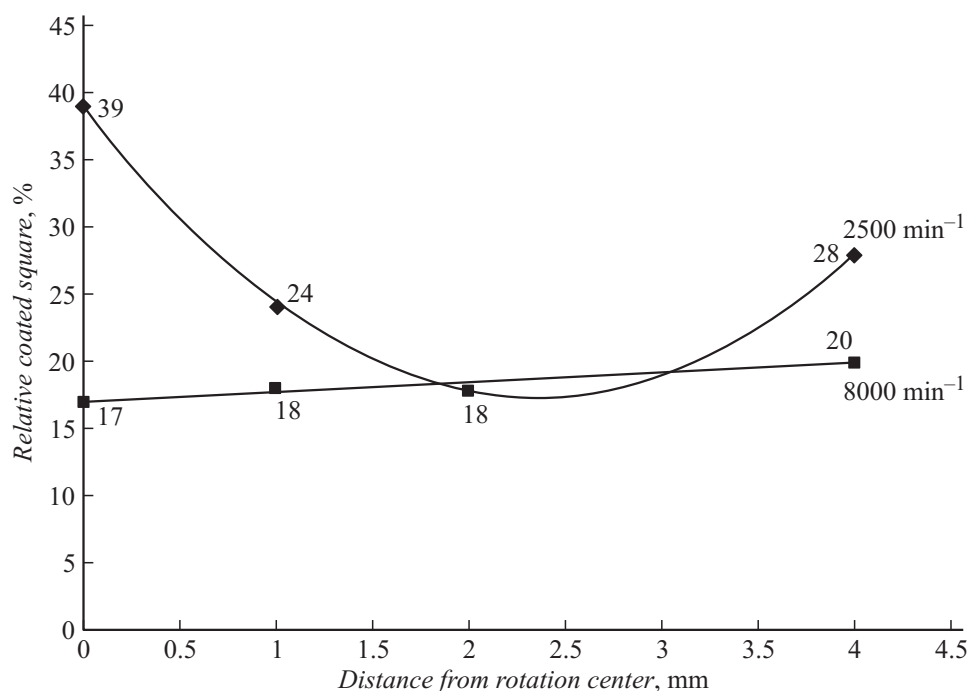


Рис. 3. Зависимость относительной площади покрытия подложки от расстояния до оси вращения при двух разных скоростях вращения подложки, по данным статистического анализа.

Скорость вращения составляла 2500 и 8000 min^{-1} соответственно. Обработка изображений показала изменение площади покрытия в зависимости от расстояния расположения изучаемой области подложки от центра для образца, вращающегося со скоростью 2500 min^{-1} , и практическую независимость от указанного расстояния для образца, вращающегося со скоростью 8000 min^{-1} (рис. 3).

Таблица 2. Относительная площадь покрытия подложки (скорости вращения образца при разных режимах статистической обработки)

№ образца	Увеличение	Скорость	Относительная площадь покрытия
51-2	X 35 000	0	$27 \pm 3\%$
	X 80 000	0	$22 \pm 2\%$
	X 200 000	0	$17 \pm 2\%$
52-2	X35 000	2500	$37 \pm 3\%$
	X80 000	2500	$34 \pm 3\%$
	X 200 000	2500	$21 \pm 2\%$
53-2	X 35 000	5000	$14 \pm 2\%$
	X 80 000	5000	$10 \pm 1\%$
	X-200 000	5000	$13 \pm 2\%$
54-2	X 35 000	8000	$7 \pm 1\%$
	X 80 000	8000	$9 \pm 1\%$
	X-200 000	8000	$7 \pm 1\%$

Для меньшей из скоростей (2500 min^{-1}) зависимость процента покрытия от расстояния до центра подложки имеет сложный вид. Сравнительно большая плотность вблизи оси вращения связана с тем, что центробежной силы оказалось недостаточно для равномерного распределения раствора по подложке за время высыхания пленки раствора на подложке. Некоторое увеличение плотности на удалении связано с краевым эффектом. На больших скоростях (8000 min^{-1}) растекание происходит с большей интенсивностью, что обеспечивает выравнивание заполнения за времена испарения пленки.

Для исследования зависимости площади покрытия алмазными частицами подложки Si от числа стандартных последовательных нанесений раствора на одну и ту же подложку также было выбрано 4 образца (табл. 1): 62, 63, 65 и 66. Количество циклов нанесения раствора составляло 1, 2, 3 и 5 соответственно. Серии изображений представлены на рис. 4, а относительная площадь покрытия подложки в зависимости от числа стандартных нанесений изображен графически на рис. 5.

Размеры кластеров ДНА, представленные на рис. 5, не зависят от числа циклов нанесения раствора, а заполнение подложки равномерно возрастает.

При условии полной воспроизводимости режима нанесения раствора должна была бы наблюдаться точная линейная зависимость плотности покрытия от числа циклов. Разброс точек может указывать на определенную методическую погрешность режимов нанесения (до 30%), а также на тенденцию к образованию объемных агрегатов частиц ДНА при высыхании коллоидного

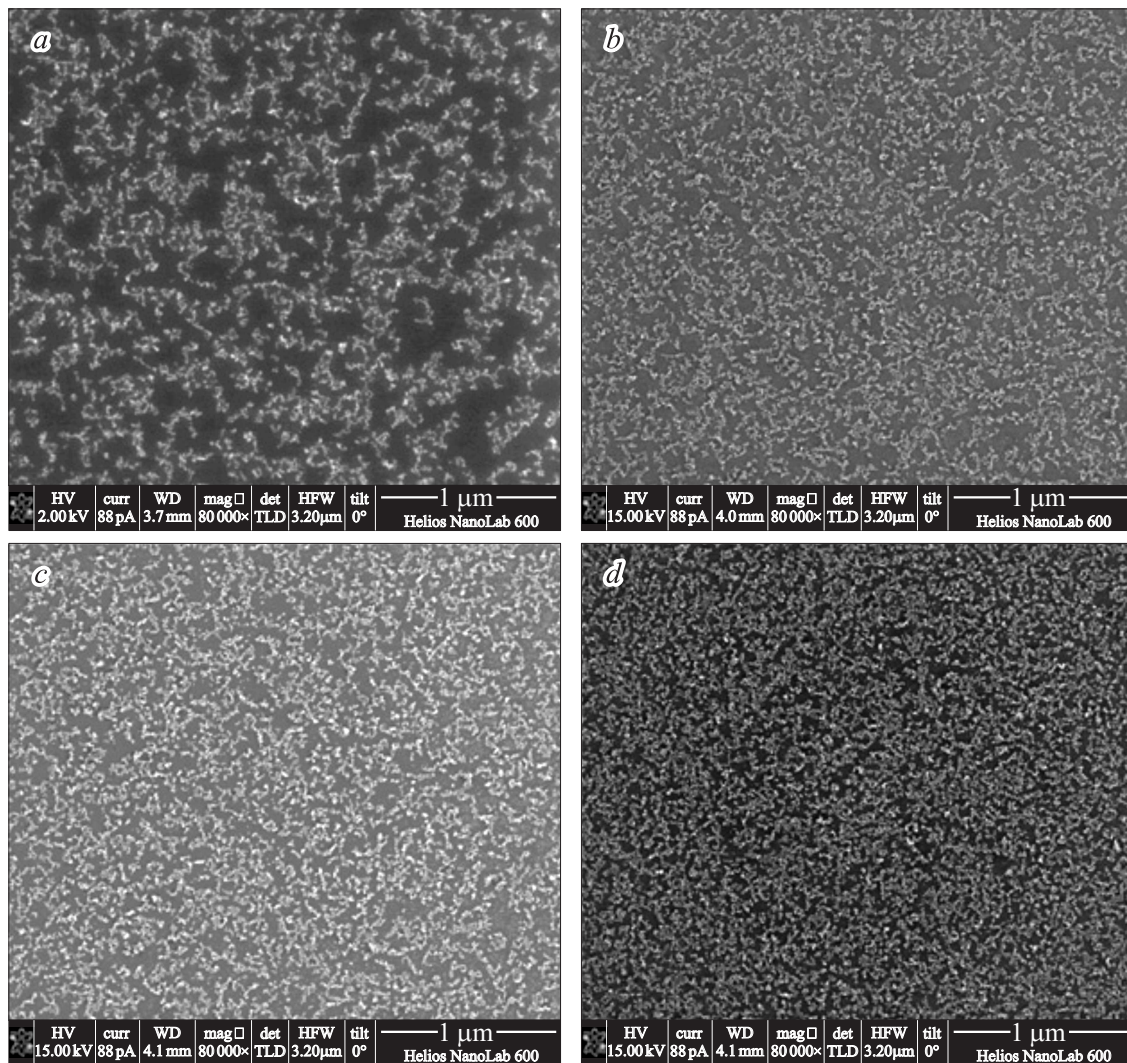


Рис. 4. РЭМ изображения образцов пленок с разным количеством циклов нанесения раствора: *a* — 62 (1 цикл нанесения), *b* — 63 (2 цикла нанесения), *c* — 65 (3 цикла нанесения), *d* — 66 (5 циклов нанесения).

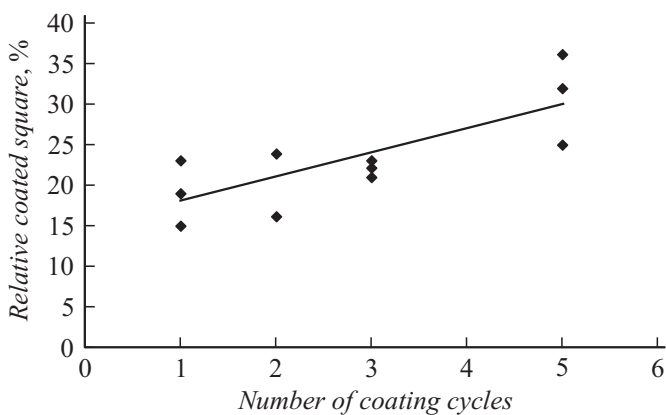


Рис. 5. График зависимости относительной площади покрытия подложки кластерами ДНА от количества циклов нанесения коллоидного раствора.

раствора. Тем не менее отчетливый рост относительной площади покрытия с увеличением числа циклов нанесения коллоидного раствора ДНА соответствует предположению о постоянстве условий формирования слоев в последовательных циклах и позволяет выполнить несложную оценку площади заполнения подложки, исходя из параметров режима нанесения слоев.

Для нашей оценки выделим две стадии процесса формирования пленки из раствора при центрифугировании. На первой стадии процессом, определяющим толщину пленки, является вязкое течение, а на второй — испарение растворителя вплоть до окончательного формирования пленки растворенного вещества. При этом на первой стадии сразу после смачивания подложки раствором происходит образование адсорбционного слоя на подложке, а на второй — завершение формирования пленки по мере высыхания растворителя в пленке раствора, удерживаемой на вращающейся подложке силами сцепления.

Таким образом, окончательная толщина δ пленки определяется следующим выражением:

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta', \quad (1)$$

где первое слагаемое соответствует толщине адсорбционного слоя, который сформировался практически одновременно с соприкосновением раствора и подложки (т.е. на первой стадии процесса), а второе обусловлено добавочным количеством растворенного вещества, поступившим в пленку на второй стадии процесса при высыхании слоя раствора, удержанного на подложке. Выражение (1) дает усредненную по подложке толщину пленки. Для разбавленного раствора справедлив закон Генри — пропорциональность между двумерной концентрацией вещества в адсорбционном слое на подложке и объемной концентрацией в растворе. Толщина первичного адсорбционного слоя пропорциональна начальной концентрации раствора и в первом приближении не зависит от скорости вращения.

Дальнейшее увеличение толщины пленки ($\Delta\delta$) происходит за счет растворенного вещества, заключенного в объеме слоя раствора, который удерживается силами поверхностного натяжения и межмолекулярного сцепления растворенного вещества на подложке.

Для описания формирования этой части пленки перейдем в систему отсчета, вращающуюся вместе с подложкой. Существует определенная максимальная толщина слоя раствора h_1 , достигнув которую он перестанет перемещаться на вращающейся подложке. Эта толщина определяется равенством центробежных сил и сил сцепления, которые связаны с поверхностным натяжением раствора.

Оценим интегральную величину силы, с которой жидкость, вращающаяся вместе с диском, в слое радиусом r и толщиной dr давит на внешние слои жидкости. Эта сила равна

$$dF = 2\pi\rho\omega^2 h_1 r^2 dr, \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости. Тогда полная сила определяется интегралом выражения (2) по радиусу

$$F = \frac{2}{3}\pi\rho\omega^2 h_1 R^3. \quad (3)$$

В предположении, что форма пленки соответствует диску, давление на его внешнюю стенку

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\frac{2}{3}\pi\rho\omega^2 h_1 R^3}{2\pi R h_1} = \frac{\omega^2 \rho R^2}{3}. \quad (4)$$

Это давление в отсутствии вязких потоков компенсируется поверхностным натяжением σ_0 и силами сцепления частиц ДНА σ' :

$$2\pi R(\sigma_0 + \sigma') = 2\pi R h_1 p \quad (5)$$

или

$$h_1 = \frac{\sigma_0 + \sigma'}{p} = \frac{3(\sigma_0 + \sigma')}{\omega^2 \rho R^2}. \quad (6)$$

Из-за того что концентрация ДНА в реальных экспериментах невелика, соответствующими силами сцепления на фоне поверхностного натяжения растворителя в оценках можно пренебречь. Подставляя табличные значения [14] $\sigma = 0.07 \text{ N/m}$ (вода), $\omega = 838 \text{ rad/s}$ (8000 min^{-1}), $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $R = 0.005 \text{ m}$, получаем оценку толщины в конце первой фазы: $h_1 = 12 \mu\text{m}$.

Передача вращательного момента от подложки жидкому раствору происходит за счет вязкого трения в направлении оси z , нормальной к подложке. Уравнение для вязкости имеет вид

$$\rho \frac{\partial V_r}{\partial t} = \eta \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2}, \quad (7)$$

откуда время раскрутки жидкости толщины h_1 до скорости подложки можно оценить по формуле

$$t \propto \frac{\rho h_1^2}{\eta}. \quad (8)$$

При вязкости раствора $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (равной вязкости воды при комнатной температуре) это время составляет около $1 \mu\text{s}$ (при использовании ранее найденного значения h_1). В действительности вязкость коллоидного раствора с сильным кулоновским взаимодействием частиц в подобных экстремальных условиях может быть много больше, так что приведенная оценка, скорее всего, завышена.

С момента, когда пленка раствора на подложке истончается настолько, что сил сцепления жидкости с подложкой хватает для поддержания их вращения как целого, вплоть до полного высыхания основным механизмом формирования толщины пленки является испарение растворителя. Толщина пленки меняется за счет ухода растворителя и образования на подложке твердой фазы. Остаточную толщину пленки после высыхания h_2 можно оценить по молярной концентрации растворенного вещества. Можно показать, что

$$\Delta\delta = \frac{cM}{\rho} h_1, \quad (9)$$

где c — объемная концентрация раствора частиц массой M . Для оценки времени испарения пленки жидкости можно воспользоваться формулой [14]

$$t = \frac{\pi\rho_L h R}{8D\rho_R(1-p)}, \quad (10)$$

где ρ_L — плотность жидкости в капле, ρ_R — плотность насыщенного пара жидкости при данной температуре (для воды 0.02 kg/m^3 при комнатной температуре), D — коэффициент диффузии пара в воздухе (для водяного пара при комнатной температуре эта величина составляет $0.24 \text{ cm}^2/\text{s}$ [14] и имеет тот же порядок для большинства других растворителей), p — относительная концентрация пара испаряемого вещества (для воды — относительная влажность воздуха). Оценка скорости

высыхания по данной формуле для водяной пленки толщиной $1\ \mu\text{m}$ дает величину порядка 5 s (а с учетом ускорения испарения за счет наличия растворенного вещества — несколько быстрее), что гораздо больше найденного ранее времени разгона раствора до угловой скорости подложки (8).

Подставляя (6) в (9), получаем

$$\delta' = \frac{3cM(\sigma_0 + \sigma')}{\omega^2 \rho^2 R^2}. \quad (11)$$

Из (1) с учетом (11) следует

$$\delta = \delta_0 + \frac{3cM(\sigma_0 + \sigma')}{\omega^2 \rho^2 R^2}, \quad (12)$$

причем силы, связывающие агрегаты в растворе, зависят от концентрации ДНА:

$$\sigma' = \sigma'(c). \quad (13)$$

Если начальная концентрация раствора не меняется, выражение (12) удобно переписать в виде

$$\delta(\omega) = a + \frac{b}{\omega^2}, \quad (14)$$

выражающем зависимость финальной толщины пленки от скорости вращения подложки при нанесении раствора, где a и b — некоторые независимые в первом приближении от угловой скорости коэффициенты. В случае неполного покрытия подложки (14) дает функциональную форму для описания средней толщины, которая, в свою очередь, пропорциональна относительной площади покрытия. Таким образом, для описания относительной площади покрытия подложки как функции скорости вращения можно воспользоваться формулой, аналогичной (14)

$$P(\omega) = A + \frac{B}{\omega^2}. \quad (15)$$

Необходимо подчеркнуть, что формула (15) получена в предположении высоких скоростей вращения, когда толщина пленки примерно однородна. При малых скоростях коэффициенты в (15) будут зависеть от расстояния точки измерения относительной площади покрытия до оси вращения. На рис. 6. представлено сопоставление экспериментальных данных (табл. 2) с расчетами, выполненными и использованием выражения (15). Рис. 6 демонстрирует, что разработанная модель количественно согласуется с экспериментально определенной зависимостью площади покрытия от скорости вращения подложки.

Выводы

Таким образом, показано, что технология центрального нанесения (spin-coating) позволяет получать

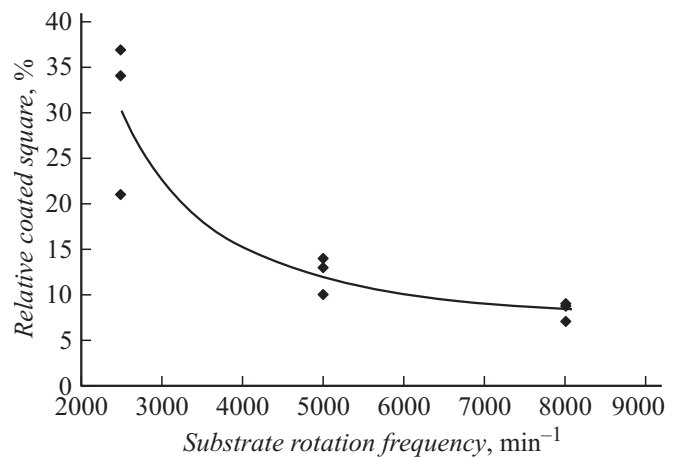


Рис. 6. Аппроксимация экспериментальных данных (табл. 2) по зависимости процента покрытия подложки от скорости ее вращения с помощью построенной модели ($A \approx 6$, $B \approx 1.5 \cdot 10^8$).

на подложках с атомным упорядочением пленки ДНА управляемой толщины. При этом:

1. Пленки, полученные из исследованных коллоидных растворов, состоят из наноалмазных частиц размером 2–10 nm, связанных в агломераты. Сами наноалмазные частицы представляют собой кристаллиты в виде полиэдров удлиненной формы. Форма полиэдров может изменяться в зависимости от содержания двойников.

2. Полученные пленки представляют собой тонкие слои толщиной в 1–3 частицы ДНА, состоящие из отдельных кластеров. По-видимому, образование кластеров из частиц ДНА в значительной степени происходит в процессе испарения растворителя, поскольку с ростом скорости вращения подложки (и сокращением времени испарения в связи с уменьшением толщины слоя удерживаемого на подложке раствора) размер кластеров заметно уменьшается. Это создает возможность управления морфологией кластеров изменением скорости вращения подложки.

3. Равномерное покрытие подложки из кристаллического Si пленкой ДНА достигается при высоких скоростях вращения (около $8000\ \text{min}^{-1}$). При меньшей частоте вращения (около $2000\ \text{min}^{-1}$) наблюдается существенная зависимость относительной площади покрытия от радиуса (плотность покрытия уменьшается по мере увеличения расстояния от центра вращения подложки).

4. При прочих равных условиях с увеличением скорости вращения подложки от 2500 до $8000\ \text{min}^{-1}$ плотность покрытия кремниевой подложки частицами ДНА уменьшается примерно в 3 раза.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке эмиттеров электронов на основе наноалмазов, которые найдут приложения в электронно-вакуумных приборах. При использовании растворов ДНА, содержащих NV-центры, разработанные технологии слоев могут способствовать созданию тонкопленочных систем кубитов для квантовых компьютеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 13-03-12276 офи-м. А.Е. Алексенский благодарит за финансовую поддержку РФФИ (проект 14-13-00795).

Авторы благодарят А.Я. Вуля и В.А. Барачевского за плодотворные обсуждения рукописи статьи.

Список литературы

- [1] Жуков А.Н., Гареева Ф.Р., Алексенский А.Е., Вуль А.Я. // Коллоид. журн. 2010. Т. 72. № 5. С. 8.
- [2] Лямкин А.И., Петров Е.А., Еришов А.П., Сакович Г.В., Ставер А.М., Титов В.М. // ДАН СССР. 1988. Т. 302. С. 611.
- [3] Greiner N.R., Philips D.S., Volk F. // Nature. 1988. Vol. 333. P. 440.
- [4] Dolmatov V.Yu. Synthesis and post_synthesis treatment of detonation nanodiamonds // In: Ultra_Nanocrystal line Diamond: Syntheses, Properties and Applications. Eds. Shenderova O., Gruen D. NY: William Andrew Inc., 2006. P. 379.
- [5] Aleksenskiy A., Baidakova M., Osipov V., Vul' A. The Fundamental Properties and Characteristics of Nanodiamonds. In: Nanodiamonds: Applications in Biology and Nanoscale Medicine. Ed. Ho D. Dordrecht: Springer, 2009.
- [6] Hartley Ch.J., Shergold H.L. // Int. J. Miner. Pross. 1982. Vol. 9. P. 219.
- [7] Shenderova O., Petrov I., Walsh J., Grichko V., Grishko V., Tyler T., Cunningham G. // Diamond Relat. Mater. 2006. Vol. 15. P. 1799.
- [8] Petrov I., Shenderova O., Grishko V., Grichko V., Tyler T., Cunningham G., McGuire G. // Diamond Relat. Mater. 2007. Vol. 16. P. 2098.
- [9] Gibson N., Shenderova O., Luo T.J.M., Moseenkov S., Bondar V., Puzyr A., Purdov K., Fitzgerald Z., Brenna B.W. // Diamond Relat. Mater. 2009. Vol. 18. P. 620.8.
- [10] Тихонов А.С., Штыкова А.А., Лебедев-Степанов П.В., Петров А.Н., Алфимов М.В. // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 9–10. С. 40.
- [11] Meyerhofer D. // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. N 7. P. 993.
- [12] Lebedev-Stepanov P., Vlasov K. // Colloid. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects. 2013. Vol. 432. P. 132.
- [13] Алексенский А.Е., Вуль А.Я., Коняхин С.В., Рейх К.В., Шаронова Л.В., Эйдельман Е.Д. // ФТТ. 2012. Т. 54, Вып. 3. С. 541
- [14] Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. М.: Изд-во АН СССР. 1958.
- [15] Григорьев И.С. Физические величины. Справочник. М.: Энергоиздат. 1991.