

УДК 537.9; 54.057

Влияние аргона на газоструйный синтез алмазных покрытий из смеси H_2+CH_4+Ar , активированной в СВЧ-разряде*

**А.А. Емельянов, В.А. Пинаев, М.Ю. Плотников, А.К. Ребров,
Н.И. Тимошенко, И.Б. Юдин**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: vika@itp.nsc.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния добавки аргона на газоструйный синтез алмаза из смеси водорода с метаном. Особенностью рассматриваемого газоструйного метода является использование высокоскоростной струи для транспортировки газов, активированных в СВЧ-плазме в разрядной камере, к подложке, расположенной в камере осаждения. Для систематического исследования плазмы СВЧ-разряда в разрядной камере применяется метод оптической эмиссионной спектроскопии. Полученные на молибденовой подложке образцы алмазных покрытий исследуются методами сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Ключевые слова: алмаз, СВЧ-плазма, газоструйное осаждение, оптическая эмиссионная спектроскопия.

Введение

Микроволновое излучение широко используется для активации газовых смесей, содержащих водород и углерод, при газофазном синтезе алмазных покрытий [1–3]. Исследованию особенностей этого метода синтеза алмаза (в англоязычной литературе — MPCVD) посвящено большое количество работ [4–8]. Активированные компоненты, из которых на поверхности подложки синтезируются алмазные кристаллы, диффундируют к подложке под влиянием градиентов концентрации и температуры при слабом или несущественном влиянии конвекции. Найдено множество конструктивных решений для реализации способов создания плазмы над подложкой [3, 6, 7].

В настоящее время развивается газоструйная модификация рассматриваемого метода [9–11], основанная на использовании сверхзвуковой струи для доставки активированных компонент к подложке. Конструктивной особенностью такого подхода является применение реактора, состоящего из двух камер: для активации газов (разрядная камера) и для размещения подложки (камера осаждения). Показана возможность достижения

* Работа выполнена в рамках государственного задания (бюджетный грант № 121031800218-5).

больших скоростей синтеза алмаза из метановодородной смеси (78 мкм/час) при использовании этого метода [10]. Авторами [11] были представлены результаты исследования влияния концентрации метана в метановодородной смеси на газоструйный синтез алмаза. В работах [12, 13] проводился численный анализ течений смесей газов, формирующихся в условиях газоструйного осаждения. В исследованиях [9, 14] с помощью численных методов изучался процесс формирования микроволновой плазмы в используемой конфигурации.

К настоящему времени известно, что процесс синтеза алмаза определяется концентрацией атомарного водорода и продуктов разложения метана (прежде всего, метила) у поверхности подложки [1, 2]. Образование указанных компонент происходит при возбуждении смеси водорода с метаном в СВЧ-разряде и их последующем разложении. Добавление аргона в смесь газов-предшественников при использовании «классического» метода MPCVD позволяет существенно увеличить скорость синтеза алмаза (см., например, работы [5, 8]). Так, авторы [8] отмечали, что в их экспериментах при добавлении 20 % аргона скорость роста систематически повышалась в 2–4 раза. Одно из объяснений роста скорости синтеза — увеличение температуры смеси (на ~ 500 К [5, 8]), способствующее большей термической диссоциации водорода. Так как теплопроводность аргона на порядок ниже, чем у водорода, то тепло из плазменного облака менее эффективно переносится к боковым стенкам реактора. Это приводит к меньшему по размеру и более горячему плазменному ядру, чем можно было бы ожидать от газовой смеси H_2/CH_4 [5]. Таким образом, добавляя аргон, можно повысить температуру газа в плазме без введения более высокой микроволновой мощности. При этом численно-экспериментальные исследования [15] показали, что условия в горячем ядре плазменного облака с температурой газа $T \sim 3000$ К являются перегретыми для образования метила, а более оптимальными для его формирования являются области с $T \sim 2000$ К вблизи подложки. В силу существенного отличия способа доставки активированных компонент к подложке в газоструйном методе от «классического» подхода эти данные являлись дополнительным стимулом к проведению представленного исследования.

1. Методика газоструйного синтеза алмаза

В данной работе приведены результаты систематического экспериментального исследования влияния аргона на формирование плазмы в разрядной камере и на газоструйный синтез алмаза из смеси $H_2/CH_4/Ar$. Расход подаваемого водорода в экспериментах менялся от 6000 до 10000 sccm (standard cubic centimeters per minute (sccm) — стандартные кубические сантиметры в минуту), а аргона от 0 до 2000 sccm. Расход метана составлял 1 % расхода водорода. Также было выполнено несколько экспериментов с повышенным до 2 % расходом метана. Для исследования плазмы СВЧ-разряда в разрядной камере использовался метод оптической эмиссионной спектроскопии. Полученные образцы алмазных покрытий исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

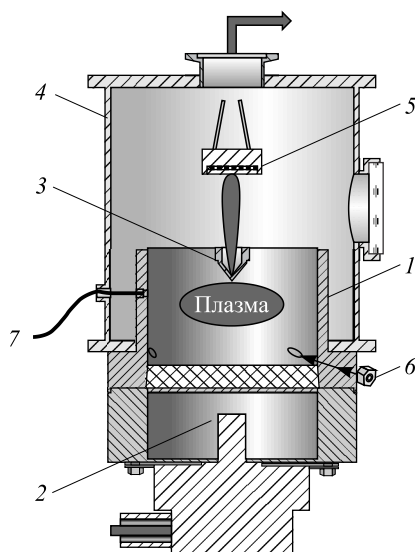
Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Смесь газов-предшественников поступает через канал 6 в разрядную камеру 1, в которой под действием излучения от антенны магнетрона 2 формируется СВЧ-разряд над входом в звуковое сопло 3. Активированный в СВЧ-разряде газ истекает через сопло 3 диаметром 2 мм в камеру осаждения 4 к водоохлаждаемой подложке 5, где происходит синтез алмазных структур из активированных компонентов смеси. Для создания плазменного облака

Рис. 1. Схема установки.

1 — разрядная камера, 2 — антенна магнетрона, 3 — сопло,
4 — камера осаждения, 5 — подложка,
6 — канал для подачи газов, 7 — спектрометр.

применялся магнетрон (3 кВт, 2,45 ГГц). Чистота используемых газов была следующей: водород — 99,99 %, аргон — 99,998 %, метан — 99,9 %. Давление в разрядной камере 1 и в камере осаждения 4 измерялось с помощью баратрона. Погрешность измерения давления составляла менее 1 %, изменение температуры подложки за время осаждения не превышало 50 К. Расход подаваемого в разрядную камеру 1 водорода поддерживался постоянным с помощью расходомера Bronkhorst type S.N. M8208910A, а метана и аргона — с помощью type E-7500-AAA с погрешностью 1 %.

Критический диаметр конусного сопла составлял 2 мм. Во всех экспериментах подложка устанавливалась на расстоянии 25 мм от критического сечения сопла. Для измерения температуры подложки применялись термопара и пирометр. В качестве подложки использовался шлифованный молибденовый диск толщиной 3,5 мм, диаметром 25 мм. До начала эксперимента поверхность подложки обрабатывалась струей смеси атомарного и молекулярного водорода, активированной СВЧ-разрядом. Стимуляция зародышеобразования алмаза путем нанесения на подложку дополнительных центров нуклеации не проводилась. Давление в камере осаждения поддерживалось на уровне 40–80 торр. Подробнее методика проведения экспериментов описывалась в работе [11].



2. Спектроскопические измерения плазмы СВЧ-разряда

Для исследования плазмы СВЧ-разряда использовался метод оптической эмиссионной спектроскопии. Регистрация излучения разряда осуществлялась через кварцевое окно в разрядной камере 1 с помощью оптического световода, соединенного со спектрометром 7 Avantes AvaSpec 2048 FT, имеющего дифракционную решетку 1200 шт/мм и разрешение 0,18 нм в спектральном диапазоне 350–600 нм и дифракционную решетку 600 шт/мм и разрешение 0,4 нм в спектральном диапазоне 600–1000 нм. Были проведены спектроскопические измерения температуры смеси газов и интенсивностей спектральных линий атомарного водорода H и полос радикалов CH, C₂. Измерение температуры газа в разрядной камере осуществлялось по спектру излучения вращательной структуры полосы (0-0) перехода $d^3\Pi_g \rightarrow a^3\Pi_u$ C₂. Для этого были рассчитаны длины волн и соответствующие интенсивности излучения линий трех подветвей P, R и двух подветвей Q. Необходимые константы для расчета тонкой структуры были взяты из работы [16]. Полученный линейчатый спектр излучения корректировался в соответствии с предварительно найденной аппаратной функцией используемого в работе спектрального прибора. Измеренный спектр излучения (0-0) полосы Свана аппроксимировался методом наименьших квадратов. Варьируя величину вращательной температуры, авторы достигали лучшей аппроксимации и таким образом определяли температуру состояния $d^3\Pi_g$, считая, что она близка к температуре газа [17]. Точность измерения абсолютного значения

температуры газа составляла 10 %. Более подробное описание используемого в работе метода определения вращательной температуры можно найти в работе [11]. Расход метана в экспериментах, описанных в этом разделе, составлял 1 % расхода водорода.

На рис. 2а и 2b приведены зависимости давления и температуры в разрядной камере от расхода аргона для разного количества подаваемого водорода. Увеличение расхода аргона приводит к более существенному возрастанию давления, чем аналогичное изменение расхода водорода. Это обусловлено, в частности, значительным повышением

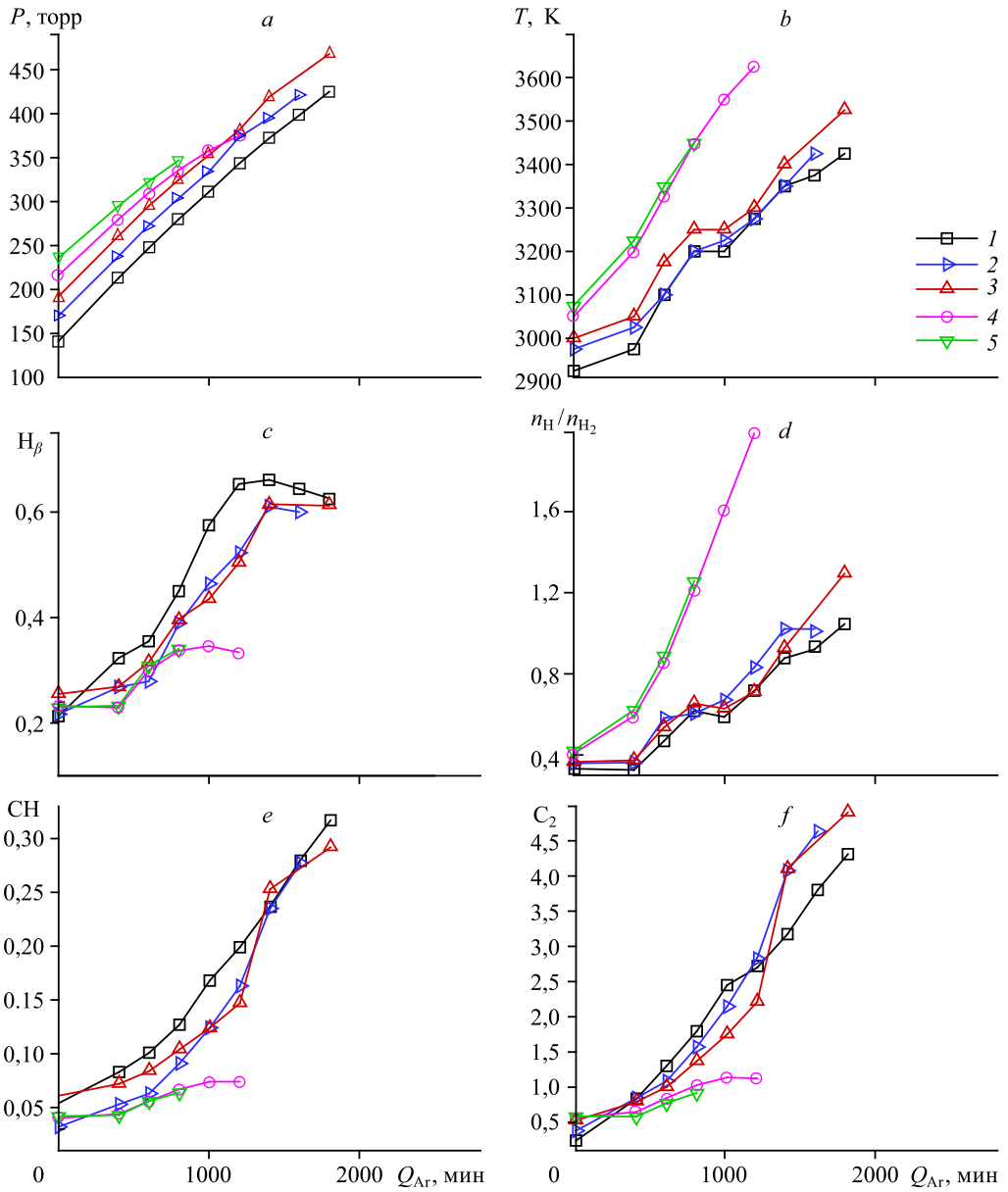


Рис. 2. Зависимость давления (а), температуры (b), интенсивности излучения линии H_{β} (486,1 нм) (с), отношения плотностей n_H/n_{H_2} (d), интенсивности излучения линий CH (434,1 нм) (e) и C_2 (516,3 нм) (f) от расхода аргона (scst) для расходов водорода 6000 (1), 7000 (2), 8000 (3), 9000 (4), 10000 (5) scst.

температуры смеси, что подтверждается ее измерениями (рис. 2b). При повышении давления в разрядной камере имеют место следующие процессы:

- вследствие увеличения числа столкновений электронов с атомами и молекулами газов происходит нагрев газа и охлаждение электронов;

- возможно увеличение плотности электронов (вследствие увеличения плотности углеродсодержащих частиц с меньшим потенциалом ионизации, чем у водорода), в результате чего может снижаться их температура;

- увеличение плотности частиц приводит к ускорению газофазных реакций, в частности, может ускоряться переработка метана в ацетилен (при высокой температуре).

Рост температуры смеси в разрядной камере ускоряет термическую диссоциацию водорода и увеличивает скорость разложения метана, в частности, преобразования его в ацетилен.

На рис. 2c представлены результаты измерения интенсивности излучения линии атомарного водорода H_β . Интенсивность излучения линии атомарного водорода I_{ki} может быть представлена в следующем виде:

$$I_{ki} = C_{ki} \cdot n_e \cdot n_H \cdot e^{-E_k/kT_e}, \quad (1)$$

где C_{ki} — константа, n_e — концентрация электронов, n_H — концентрация атомов водорода, E_k — энергия верхнего состояния, переход с которого на нижний уровень (i) приводит к излучению, T_e — температура электронов. Для расходов водорода от 6000 до 8000 сссм наблюдается рост интенсивности излучения H_β с увеличением подачи аргона до 1400 сссм. Причем значительный рост начинается с расхода аргона 800 сссм. При дальнейшем увеличении расхода аргона (больше 1400 сссм) наблюдается снижение интенсивности H_β . Для расхода 9000–10000 сссм водорода небольшие расходы аргона оказывают малое влияние на изменение интенсивности излучения H_β . Рост интенсивности излучения H_β в этом случае наблюдается при расходе аргона более 600 сссм.

На рис. 2d представлено расчетное отношение числовых плотностей n_H/n_{H_2} в разрядной камере для разных расходов водорода и аргона. Отношение рассчитано исходя из экспериментальных значений температуры и давления в разрядной камере (рис. 2a, 2b) с использованием данных о термическом разложении водорода в равновесных условиях [18]. Отметим, что атомарный водород играет ключевую роль в кинетической стабилизации алмазной фазы, а также в травлении неалмазных фаз (sp^2 -углерод). Таким образом, можно ожидать существенного роста доли атомарного водорода при добавке аргона вследствие увеличения температуры смеси.

В работах [19, 20] было сделано предположение, что радикалы CH_x чаще приводят к образованию sp^3 -гибридизации углерода в реакциях газ–поверхность, чем радикалы C_2H_x . Следовательно, увеличение отношения содержания радикала C_2 к CH в смеси может приводить к большему образованию неалмазной фазы в осажденных структурах. Для анализа воспользуемся данными об интенсивностях излучения линий радикалов CH (434,1 нм) и C_2 (516,3 нм), отражающих их содержание в плазме [21, 22]. На рис. 2e и 2f приведены зависимости интенсивности излучения линий CH и C_2 . Следует отметить качественно похожее поведение интенсивностей: их рост с увеличением количества подаваемого аргона.

Представленные на рис. 2 данные позволяют сделать следующие выводы.

1. При увеличении подачи аргона наблюдается рост температуры смеси газов. Также возрастает давление, причем этот рост определяется не только ростом температуры, но и ростом числовой плотности смеси газов.

2. Зависимости интенсивностей излучения H_{β} от расхода аргона неодинаковы для разных расходов водорода. Для расходов водорода 6000–8000 sccm небольшое количество аргона приводит к росту интенсивности излучения H_{β} , далее наблюдается максимум интенсивности и ее падение. Для больших расходов водорода изменение интенсивности H_{β} наблюдается лишь при больших расходах аргона.

3. Интенсивности излучения CH и C_2 растут с ростом подачи аргона.

Добавка аргона способствует образованию большего количества атомарного водорода. Однако также наблюдается рост интенсивностей C_2 и CH , что свидетельствует об ускорении разложения метана и возможном уменьшении количества метила. Особенно в этом смысле показателен рост интенсивности C_2 . Увеличение количества атомарного водорода способствует синтезу алмаза, а уменьшение количества метила замедляет его. В связи с этим очевидна необходимость отдельной активации водорода и углеродсодержащих газов.

Результаты измерений методом оптической эмиссионной спектроскопии свидетельствуют о возможности существенного увеличения скорости синтеза алмаза при использовании аргона в условиях газоструйного осаждения.

3. Получение алмазных покрытий

Рассматриваемые эксперименты выполнялись с использованием оборудования УНУ ВГК ИТ СО РАН (Уникальные научные установки вакуумного газодинамического комплекса Института теплофизики СО РАН). Полученные образцы алмазных покрытий исследовались методами сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Было выполнено несколько серий экспериментов, нацеленных на оценку влияния добавок аргона, исходя из данных анализа спектроскопических измерений. При этом принимались во внимание численные и экспериментальные данные [11–13], полученные при исследовании влияния расхода смеси, состоящей из метана и водорода, на газоструйный синтез.

Эксперименты проводились при давлении в камере осаждения, равном 80 и 40 торр. Уменьшение давления в камере осаждения позволило получить более равномерное покрытие, но скорость роста алмаза также уменьшилась. Возможно, это уменьшение скорости было связано с оттоком атомарного водорода из ядра струи [13]. Далее проанализируем результаты экспериментов при 80 торр.

Исходя из данных по атомарному водороду (рис. 2с и 2d) была выполнена серия экспериментов с малым расходом водорода (до 7000 sccm) для разного расхода аргона. Расход метана составлял 1 % от расхода водорода. Отметим, что уменьшение расходов водорода и метана приводит к уменьшению потока активированных компонент к подложке [12], вследствие чего возможно снижение скорости синтеза алмаза, что подтверждается проведенными экспериментами. Так, например, при подаче смеси $7000H_2/70CH_4/1000Ar$ была достигнута скорость роста грани кристалла алмаза около 60 мкм/час.

Расход водорода 9000 и 10000 sccm привел к сокращению диапазона устойчивого горения плазмы при подаче аргона. Скорость роста алмаза при таких расходах водорода не увеличилась по сравнению с расходом 8000 sccm. Возможное объяснение этому

следующее: нагрев подаваемой смеси в разрядной камере при 9000 и 10000 ссст достигает высокой неоптимальной температуры для образования и сохранения метила [15]. Полученные результаты спектральных измерений и анализа алмазных покрытий позволяют определить режим 8000 ссст водорода и 1000 ссст аргона как наиболее оптимальный с точки зрения скорости осаждения и качества покрытия.

Отдельный интерес представляло исследование влияния расхода метана на скорость синтеза. Увеличение количества метана в подаваемой метановодородной смеси с добавкой аргона при использовании «классического» метода MPCVD позволило существенно увеличить скорость синтеза алмаза (см., например, работы [5, 8]). Так, авторы [8] отмечали, что в их экспериментах скорость роста при увеличении количества метана росла и при 15 % метана составила 105 мкм/час (при 20 % Ar). Исследования [11] показали, что при газоструйном синтезе алмаза из метановодородной смеси оптимальной является подача метана около 1 %. При дальнейшем увеличении расхода метана качество алмазного покрытия ухудшалось из-за нехватки атомарного водорода. При добавлении аргона количество атомарного водорода значительно увеличилось (рис. 2). Поэтому проведение экспериментов с увеличенной подачей метана представляет интерес.

На рис. 3 представлены СЭМ-фотографии, полученные на электронном микроскопе Hitachi SU8220 в Центре коллективного пользования при Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова. На рис. 3а видно формирование крупных кристаллов.

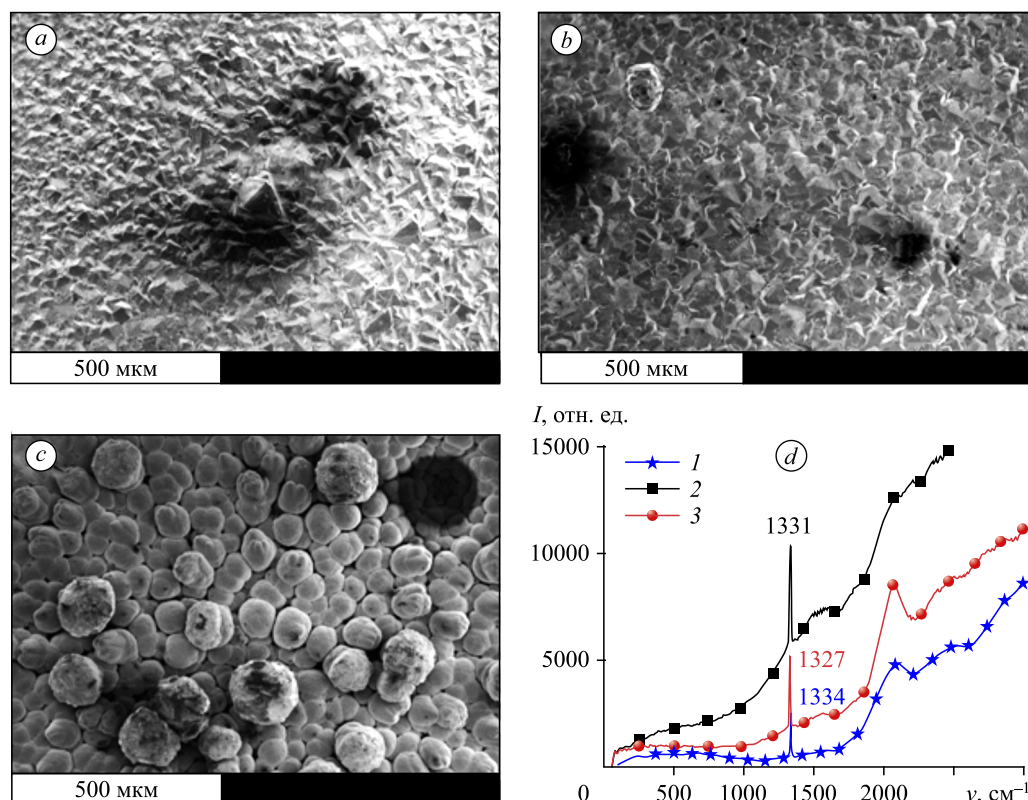


Рис. 3. СЭМ-фотографии при количестве метана 1 (а), 1,5 (b) и 2 (с) %; а также КРС-спектры осажденных пленок (d).

Время осаждения — 1 час; расход водорода и аргона — соответственно 8000 и 1000 ссст;
 1 — 1 % CH_4 , FWHM = 8,6, 2 — 1,5 % CH_4 , FWHM = 11, 3 — 2 % CH_4 , FWHM = 6,5,
 здесь FWHM (full width at half maximum) — полная ширина на уровне половины высоты.

Ребро самого большого из них, расположенного в центре, превышает 100 мкм. При увеличении количества метана до 1,5 % скорость роста возрастает, пленка остается микрокристаллической. Дальнейшее увеличение метана в смеси приводит к заметному изменению осаждаемой пленки (рис. 3с). На рис. 3д приведены спектры комбинационного рассеяния света (КРС) поверхности трех образцов, которые свидетельствуют о хорошем качестве алмазного покрытия последних. В спектре присутствует линия алмаза с волновым числом $\nu = 1334 \text{ см}^{-1}$, ее ширина на полувысоте составляет 8,5 обратных сантиметров. Флуоресценция при $\nu > 1334 \text{ см}^{-1}$ соответствует аморфному углероду. Следует отметить, что у полученных покрытий отсутствует электропроводимость. Представленные спектры показывают, что при добавлении аргона газоструйный метод позволяет получать покрытия хорошего качества при 2 % метана.

СЭМ-фотографии образцов на рис. 3с похожи на снимки, приведенные в других публикациях, например, в [23, 24]. В указанных работах они трактовались как нанокристаллические. Это позволяет авторам настоящего исследования планировать получение нанокристаллических алмазов в будущем.

В работе проводилось измерение толщины алмазного слоя полученных покрытий толщинометром TESA DIGICO 10, имеющим погрешность 2 мкм. Скорость синтеза, определенная по измеренным толщинам при 1, 1,5 и 2 % метана, составила соответственно около 130, 170 и 200 мкм в час, температура подложки в этих экспериментах равнялась 1000, 1080 и 1090 °С, колебания температуры за время осаждения не превышали $\pm 50 \text{ °С}$. Достигнутая скорость синтеза значительно превысила величину скорости, указанную в работе [10] и полученную газоструйным методом в близких условиях из смеси водорода с метаном. Таким образом, добавление аргона приводит к заметному увеличению скорости синтеза алмазного покрытия.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния добавки аргона на газоструйный синтез алмаза из смеси водорода с метаном. Для систематического исследования плазмы СВЧ-разряда в разрядной камере использовался метод оптической эмиссионной спектроскопии. Присутствие аргона в смеси газов-предшественников приводит к росту температуры газа в разряде, что, соответственно, влияет на состав смеси газов, в частности, повышается доля атомарного водорода. В то же время рост интенсивностей излучения полос C_2 и CN свидетельствует об увеличении степени разложения метана и возможном уменьшении количества метила.

Авторы провели ряд экспериментов по газоструйному синтезу алмазных покрытий на молибденовых подложках с разным расходом водорода, аргона и метана. Полученные образцы исследовались методами сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Проведенный газоструйный синтез позволил получить алмазное покрытие со скоростью роста до 200 мкм в час, что существенно больше, чем при использовании в аналогичном подходе только метановодородной смеси. Отметим, что более высокие скорости роста алмазных кристаллов в газоструйном методе достигаются в том числе за счет струйной более направленной, подачи активированной смеси к подложке.

Выполненные исследования расширили понимание влияния температуры смеси в разрядной камере и подаваемого расхода газов на условия формирования потока смеси на выходе из разрядной камеры при газоструйном методе синтеза алмазов. Полученные

данные важны для дальнейшей оптимизации методики газоструйного осаждения алмазов с использованием для активации газов-предшественников микроволнового излучения.

Список литературы

1. May P.W. Diamond thin films: a 21st-century material // Philos. Trans. Rog. Soc. London. Ser. A. 2000. Vol. 358. P. 473–495.
2. Хмельницкий Р.А. Перспективы выращивания монокристаллического алмаза большого размера // Успехи физ. наук. 2015. Т. 185. № 2. С. 143–159.
3. Сергейчев К.Ф., Луккина Н.А. Эпитаксиальный синтез алмазных слоев на монокристаллической алмазной подложке в факельном СВЧ-плазматроне // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 44–49.
4. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Lobaev M.A., Radishev D.B. Multimode cavity type MPACVD reactor for large area diamond film deposition // Diamond and Related Materials. 2018. Vol. 83. P. 8–14.
5. Tallaire A., Achard J., Silva F., Brinza O., Gicquel A. Growth of large size diamond single crystals by plasma assisted chemical vapour deposition: recent achievements and remaining challenges // Comptes Rendus Physique. 2013. Vol. 14, Iss. 2–3. P. 169–184.
6. Butler J.E., Mankelovich Y.A., Cheesman A., Ma J., Ashfold M.N.R. Understanding the chemical vapor deposition of diamond: recent progress // J. Phys.: Condens. Matter. 2009. Vol. 21. P. 364201-1–364201-20.
7. Ralchenko V.G., Inyushkin A.V., Shu G., Dai B., Karateev I.A., Bolshakov A.P., Khomich A.A., Ashkinazi E.E., Zavedeev E.V., Han J., Zhu J. Thermal conductivity of diamond mosaic crystals grown by chemical vapor deposition: thermal resistance of junctions // Phys. Rev. Applied. 2021. Vol. 16. P. 014049-1–014049-13.
8. Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Yurov V.Y., Popovich A.F., Antonova I.A., Khomicha A.A., Ashkinazi E.E., Ryzhkov S.G., Vlasov A.V., Khomich A.V. High-rate growth of single crystal diamond in microwave plasma in CH_4/H_2 and $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ gas mixtures in presence of intensive soot formation // Diamond and Related Materials. 2016. Vol. 62. P. 49–57.
9. Rebrov A.K., Bobrov M.S., Emelyanov A.A., Timoshenko N.I., Hrebtov M.Yu., Yudin I.B. Experience in the synthesis of diamond from a supersonic microwave plasma jet // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2019. Vol. 7, № 2. P. 131–137.
10. Ребров А.К., Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Тимошенко Н.И., Юдин И.Б. Синтез алмаза из высокоскоростного потока СВЧ-плазмы // Докл. АН. техн. науки. 2020. Т. 490, № 1. С. 48–51.
11. Emelyanov A.A., Pinaev V.A., Plotnikov M.Yu., Rebrov A.K., Timoshenko N.I., Yudin I.B. Effect of methane flow rate on gas-jet MPCVD diamond synthesis // J. Phys. D: Appl. Phys. 2022. Vol. 55. P. 205202-1–205202-11.
12. Ребров А.К., Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Тимошенко Н.И., Терехов В.В., Юдин И.Б. Влияние расхода смеси газов на процесс синтеза алмаза из высокоскоростного потока сверхвысокочастотной плазмы // Прикл. механика и техн. физика. 2020. Т. 61, № 5. С. 158–167.
13. Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Ребров А.К., Тимошенко Н.И., Юдин И.Б. Использование сверхзвуковой струи газа, активированного в микроволновом разряде, для осаждения алмаза // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2021. № 1. С. 106–114.
14. Hrebtov M.Yu., Bobrov M.S. Numerical optimization of hydrogen microwave plasma reactor for diamond film deposition // J. Phys: Conf. Ser. 2019. Vol. 1359. P. 012010-1–012010-6.
15. Mankelovich Yu.A., Ashfold M.N.R., Ma J. Plasma-chemical processes in microwave plasma enhanced chemical vapor deposition reactors operating with $\text{C}/\text{H}/\text{Ar}$ gas mixtures // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. P. 113304-1–113304-11.
16. Bai B., Sawin H.H., Cruden B.A. Neutral gas temperature measurements of high-power-density fluorocarbon plasmas by fitting swan bands of C_2 molecules // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 99. P. 013308-1–013308-11.
17. Lombardi G., Benedic F., Mohasseb F., Hassouni K. and Gicquel A. Determination of gas temperature and C_2 absolute density in $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{CH}_4$ microwave discharges used for nanocrystalline diamond deposition from the C_2 Mulliken system // Plasma Sources Sci. Technol. 2004. Vol. 13. P. 375–386.
18. Варграфтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2 изд. М.: Наука, 1972. 730 с.
19. Johnson C.E., Weimer W.A., Cerio F.M. Efficiency of methane and acetylene in forming diamond by microwave plasma assisted chemical vapor deposition // J. Mater. Res. 1992. Vol. 7. P. 1427–1431.
20. Han Y.-S., Kim Y.-K., Lee J.-Y. Effect of argon and oxygen addition to the CH_4/H_2 feed gas on diamond synthesis by microwave plasma enhanced chemical vapor deposition // Thin Solid Films. 1997. Vol. 310. P. 39–46.
21. Ma J., Ashfold M.N.R., Mankelovich Y.A. Validating optical emission spectroscopy as a diagnostic of microwave activated $\text{CH}_4/\text{Ar}/\text{H}_2$ plasmas used for diamond chemical vapor deposition // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 043302-1–043302-12.

22. Goyette A.N., Lawler J.E., Anderson L.W., Gruen D.M., McCauley T.G., Zhou D., Krauss A.R. C₂ Swan band emission intensity as a function of density // Plasma Sources Sci. Technol. 1998. Vol. 7. P. 149–153.
23. Выровец И.И., Грицына В.И., Дудник С.Ф., Опалев О.А., Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Нанокристаллические алмазные CVD-пленки: структура, свойства и перспективы применения // Физическая инженерия поверхности. 2010. Т. 8, № 1. С. 1–19.
24. Williams O.A., Nesladek M., Daenen M., Michaelson S., Hoffman A., Osawa E., Haenen K., Jackman R.B. Growth, electronic properties and applications of nanodiamond // Diam. Relat. Mater. 2008. Vol. 17, Iss. 7–10. P. 1080–1088.

*Статья поступила в редакцию 12 сентября 2022 г.,
после доработки — 17 ноября 2022 г.,
принята к публикации 8 декабря 2022 г.*