

УДК 533; 54.057
DOI: 10.15372/PMTF202315309

ГАЗОСТРУЙНЫЙ СИНТЕЗ ИЗ АКТИВИРОВАННОЙ В СВЧ-РАЗРЯДЕ СМЕСИ $H_2 + CH_4 + Ar$ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

А. А. Емельянов, М. Ю. Плотников, Н. И. Тимошенко, И. Б. Юдин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mails: alemelyanov@gmail.com, plotnikov@itp.nsc.ru, vika@itp.nsc.ru, yudinib@gmail.com

Развивается газоструйный метод синтеза алмазных покрытий с использованием высокоскоростной струи для переноса активированной в СВЧ-разряде смеси газов (водорода, метана и аргона) к кремниевой подложке. Разработан подложкодержатель, позволяющий сохранять целостность подложки при термических нагрузках в условиях газоструйного осаждения. Получена скорость синтеза алмаза, превысившая достигнутую ранее в газоструйных экспериментах с активацией в СВЧ-плазме без добавления аргона.

Ключевые слова: алмаз, газофазный синтез, СВЧ-разряд, газоструйное осаждение, кремний, аргон

Введение. При газофазном синтезе алмазных покрытий из газовых смесей, содержащих водород и углерод, для активации газов-предшественников широко используется сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение [1–3]. Исследованию особенностей этого метода синтеза алмазных покрытий (microwave plasma chemical vapor deposition (MPCVD)) посвящено большое количество работ (см., например, [4–8]). Активированные компоненты, из которых на поверхности подложки синтезируются кристаллы алмаза, диффундируют к подложке под влиянием градиента концентрации и температуры при слабом влиянии конвекции. Найдено множество конструктивных решений для реализации способов создания плазмы и активации газа в плазменном облаке над подложкой [3, 6, 7].

В настоящее время развивается газоструйная модификация данного метода [9–12], основанная на использовании высокоскоростной струи для доставки активированных компонентов к подложке. Конструктивной особенностью такого подхода является использование двух камер: для активации газов (разрядная камера) и для размещения подложки (камера осаждения). Активированная в разрядной камере смесь газов истекает в камеру осаждения через звуковое сопло. Показана возможность достижения с помощью такого метода больших скоростей синтеза алмаза из метановодородной смеси [11]. В работе [12] представлены результаты исследования влияния концентрации метана в метановодородной смеси на газоструйный синтез алмаза. В [13, 14] проведен численный анализ течений смесей газов, формирующихся в условиях газоструйного осаждения. В [10, 15] с помощью численных методов изучался процесс формирования микроволновой плазмы в рассматриваемой конфигурации. В [16, 17] представлены результаты спектрального и газодинамического исследований плазмы СВЧ-разряда в условиях газоструйного синтеза алмаза и их

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

© Емельянов А. А., Плотников М. Ю., Тимошенко Н. И., Юдин И. Б., 2023

анализ с целью определения температуры и состава смеси в разрядной камере. Результаты исследования влияния температуры молибденовой подложки на морфологию, состав и строение алмазных покрытий, осажденных с помощью газоструйного метода, представлены в [18].

В настоящее время известно, что скорость синтеза алмаза зависит от концентрации атомарного водорода и продуктов разложения метана (прежде всего, метила) вблизи поверхности подложки [1, 2, 19]. Образование данных компонентов происходит при активации смеси водорода с метаном в СВЧ-разряде. Добавление аргона в смесь газов-предшественников при использовании “классического” метода MPCVD позволяет существенно увеличить скорость синтеза алмаза [5, 8]. Так, в экспериментальной работе [8] отмечалось, что при добавлении 20 % аргона скорость синтеза систематически увеличивалась в 2–4 раза. Одной из причин этого увеличения является увеличение температуры смеси газов [5, 8, 16], способствующее большей термической диссоциации водорода. При использовании газоструйного подхода добавление аргона также способствует увеличению скорости синтеза алмаза [17, 20].

В большинстве случаев синтез алмазных покрытий осуществляется на подложках с температурой порядка 1300 К. Однако такая температура подложки ограничивает получение алмазных пленок на термически нестойких материалах, применяемых во многих промышленно важных областях. Поэтому разработка методов осаждения алмазных покрытий на поверхности таких материалов позволяет расширить диапазон используемых материалов подложек (кремний, карбид кремния и др.). Заметим, что одной из особенностей газоструйного осаждения алмазных покрытий является нагрев подложки до высоких температур струей активированного газа. При использовании подложек из термически нестойких материалов с низкой теплопроводностью это может приводить к их разрушению. В работе [21] представлены результаты экспериментального исследования нагрева подложек из молибдена и кремния в условиях газоструйного осаждения алмазных структур с использованием метановодородной смеси. Для улучшения отвода тепла была предложена конструкция охлаждаемого подложкодержателя с использованием металлического расплава для снижения контактного теплового сопротивления между подложкой и подложкодержателем. Использование расплава в условиях газоструйного осаждения позволило получить алмазное покрытие на кремниевой подложке с сохранением ее целостности.

Добавление аргона способствует увеличению теплового воздействия потока активированного газа на подложку, в основном за счет увеличения температуры газа в разрядной камере. Целью настоящей работы является создание методики газоструйного синтеза алмазного покрытия на кремниевой подложке из активированной СВЧ-разрядом метановодородной смеси с добавлением аргона. Для решения поставленной задачи предложен новый способ эффективного отвода тепла от кремниевой подложки в условиях газоструйного осаждения. Полученные образцы алмазных покрытий исследовались с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

1. Методика газоструйного синтеза алмазных покрытий. 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 над входом в звуковое сопло 3 формируется СВЧ-разряд. Активированный в СВЧ-разряде газ через сопло 3 истекает в камеру осаждения 4 к водоохлаждаемой подложке 5, где происходит синтез алмазных структур из активированных компонентов смеси. Для создания плазменного облака использовались магнетрон (мощность 3 кВт, частота 2,45 ГГц) и газы со следующей степенью чистоты: водород — 99,990 %, аргон — 99,998 %, метан — 99,900 %. Давление в разрядной камере 1 и в камере осаждения 4 из-

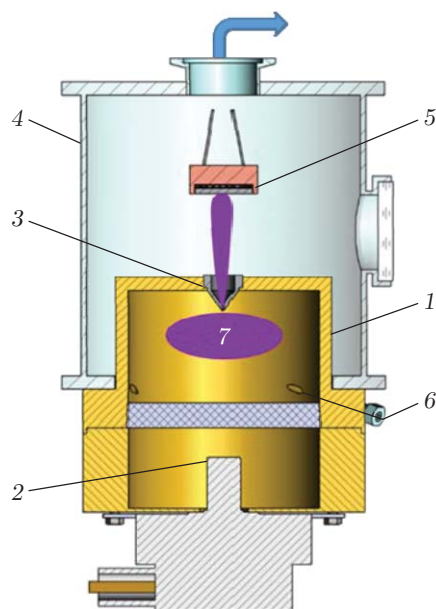


Рис. 1. Схема установки:

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

мерялось с помощью баротрона, погрешность измерения давления составляла менее 1 %. Расход подаваемого в разрядную камеру 1 водорода поддерживался постоянным с помощью расходомера Bronkhorst с контроллером E-7500-AAA, метана и аргона — с помощью расходомера-смесителя УФПГС-4. Критический диаметр конусного сопла был равен 2 мм. Во всех экспериментах подложка устанавливалась на расстоянии 22 мм от критического сечения сопла. Для измерения температуры подложки использовались пирометр и термомпара. В качестве подложки использовалась кремниевая пластина толщиной 0,5 мм и размером 10 × 10 мм. Для улучшения адгезии осаждаемого алмаза поверхность пластины была карбидизирована. До начала эксперимента поверхность подложки обрабатывалась струей смеси атомарного и молекулярного водорода, активированной СВЧ-разрядом. Согласно [22] такая обработка способствует улучшению адгезии. Стимуляция зародышеобразования алмаза путем нанесения на подложку дополнительных центров нуклеации не проводилась. Давление в камере осаждения поддерживалось на уровне 80 торр.

Анализ результатов спектральных измерений в разрядной камере и алмазных покрытий на молибденовой подложке позволил сделать вывод, что режим с расходом водорода $Q_{H_2} = 8000 \text{ н.см}^3/\text{мин}$ (при нормальных условиях давление $p = 750 \text{ торр}$, температура $T = 273 \text{ К}$) и расходом аргона $Q_{Ar} = 1000 \text{ н.см}^3/\text{мин}$ является оптимальным с точки зрения скорости осаждения и качества покрытия [17]. Поэтому в данном экспериментальном исследовании расход подаваемого водорода составлял $8000 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, аргона — $1000 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, расход метана менялся в диапазоне $80 \div 200 \text{ н.см}^3/\text{мин}$.

Эксперименты по осаждению алмазных покрытий проводились с использованием оборудования УНУ ВГК ИТ СО РАН (уникальная научная установка “Вакуумный газодинамический комплекс” Института теплофизики СО РАН). Время осаждения — 30 мин. Температура подложки поддерживалась на уровне $(1150 \pm 50) \text{ К}$. Полученные образцы алмазных покрытий исследовались с помощью методов СЭМ (электронный микроскоп Hitachi S-3400N в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ) и КРС (КР-спектрометр LabRAM HR Evaluation HORIBA, длина волны лазера 514 нм).

2. Конструкция подложкодержателя. Рассмотрим конструкцию подложкодержателя, разработанную в настоящей работе.

В условиях газоструйного синтеза алмаза подложка нагревается струей активированного газа. Температура подложки зависит от тепловых параметров потока газа, теплофизических свойств материала подложки и конструкции подложкодержателя. В осесимметричной струе газовой смеси имеет место радиальное распределение температуры и плотности, что приводит к максимальному тепловому воздействию на центральную часть подложки [14]. Для снижения термических напряжений и предотвращения разрушения подложки необходимо обеспечить малые температурные градиенты как по толщине подложки, так и в радиальном направлении. Результаты исследования [21] показали существенное влияние на формирование температуры подложки контактного теплового сопротивления между подложкой и подложкодержателем, охлаждаемым водой. Для эффективного уменьшения контактного теплового сопротивления в [21] использовалась ванна с расплавом металла с низкой температурой плавления. Это обеспечило при синтезе алмаза из метановодородной смеси на подложках из кремния температурный перепад, позволяющий сохранить целостность подложки. При более высокой температуре тепловых потоков и использовании материалов подложки с малой теплопроводностью возникает необходимость в дополнительной оптимизации процесса теплоотвода от подложки.

Использование аргона приводит к увеличению тепловых нагрузок на подложку, поскольку при добавлении аргона в газовую смесь увеличивается температура в разрядной камере [17, 20]. Так, при подаче аргона ($1000 \text{ н.см}^3/\text{мин}$) в смесь водорода и метана температура смеси в разрядной камере повышается приблизительно на 500 К [17]. На рис. 2 приведены зависимости от температуры мощности, необходимой для нагрева водорода и смеси водорода с аргоном до заданных значений температуры при типичных значениях давления в разрядной камере с учетом диссоциации водорода. Зависимости получены на основе данных об энтальпии газов [23]. Видно, что для нагрева водорода до 3000 К при давлении 180 торр требуется мощность $P \approx 1200 \text{ Вт}$, для нагрева смеси водорода с аргоном до 3500 К при давлении 342 торр — $P \approx 2500 \text{ Вт}$ (значения $p = 180 \text{ торр}$ ($p = 342 \text{ торр}$), $T = 3000 \text{ К}$ ($T = 3500 \text{ К}$) являются типичными для давления и температуры в разрядной камере в экспериментах с водородом (смесью водорода и аргона)). Представленные данные являются верхней оценкой теплового воздействия газа на подложку. В реальности тепловое

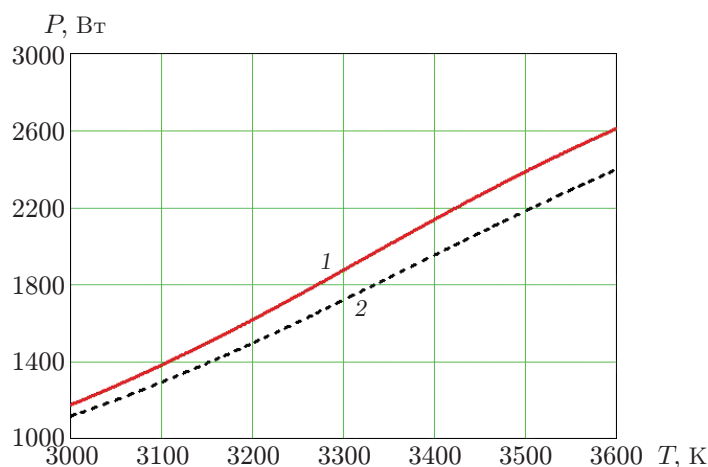


Рис. 2. Зависимость мощности, необходимой для нагрева газа, от температуры: 1 — водород ($Q = 8000 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, $p = 181 \text{ торр}$), 2 — смесь водорода с аргоном ($Q_{\text{H}_2} = 8000 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{Ar}} = 1000 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, $p = 342 \text{ торр}$)

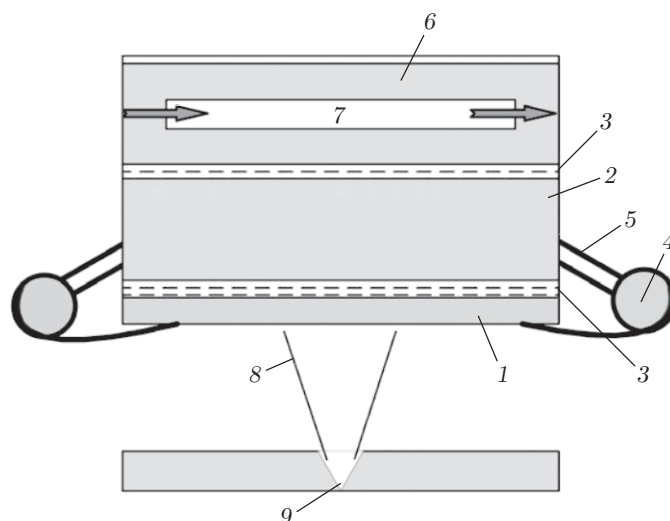


Рис. 3. Схема крепления подложки на подложкодержателе над алмазобразующей струей:

1 — подложка, 2 — промежуточное основание, 3 — пленка припоя, 4 — прижим, 5 — стойка, 6 — охлаждаемый блок, 7 — область, занятая охлаждающей жидкостью (водой), 8 — газовая струя, 9 — сопло

воздействие уменьшается вследствие разлета газа в окружающее пространство и влияния на процесс теплообмена процессов аккомодации и рекомбинации атомарного водорода.

В экспериментах наблюдалось повышение температуры подложки на $200 \div 300$ К при добавлении аргона в водород. Опыт газоструйного осаждения алмазных покрытий на подложках из кремния толщиной 0,5 мм показывает, что сохранить подложку без разрушения можно при градиенте температуры по толщине не более 300 К. В случае проведения синтеза алмаза с использованием смеси водорода с аргоном и метаном при температуре поверхности осаждения $T = 1000 \div 1400$ К и наличии тепловых потоков на подложку необходим подложкодержатель, позволяющий получить требуемый перепад температур.

На рис. 3 приведена схема разработанного подложкодержателя. Кремниевая подложка 1, имеющая размеры $10,0 \times 10,0 \times 0,5$ мм, устанавливается на промежуточном основании 2, которое представляет собой молибденовый диск диаметром 20 мм и толщиной $2 \div 20$ мм. Выбор толщины диска зависит от температуры подложки, которую необходимо обеспечить при проведении газоструйного синтеза: вследствие большего теплового сопротивления дисков с большими толщинами температура подложки увеличивается. Для уменьшения влияния неконтролируемого контактного теплового сопротивления между поверхностями подложки 1 и промежуточного основания 2 на молибден наносилось покрытие 3 из припоя на основе олова толщиной приблизительно 100 мкм. Аналогичное покрытие использовалось при установке основания 2 на рабочей полированной поверхности охлаждаемого блока 6, выполненного из меди. Подложка прижимается к основанию прижимами 4, изготовленными из вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм, закрепленной на стойках 5. Охлаждаемый блок 6 соединен со стенкой камеры с помощью подвижного соединения (на рис. 3 не показано), которое позволяет совмещать центр струйного газового потока 8 из сопла 9 с центром подложки 1. Температура подложки 1 измеряется с помощью оптического пирометра.

Работа с подложкодержателем организуется следующим образом. Устанавливается требуемый режим осаждения покрытия. С использованием полученных данных о температуре подложки и основания выбирается толщина основания 2, обеспечивающая необ-

ходимый температурный перепад между теневой и рабочей поверхностями подложки в условиях выбранного режима. Далее осуществляется осаждение алмазного покрытия.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение. Проведен газоструйный синтез алмазных покрытий на кремниевых подложках из смеси водорода, метана и аргона. Разработанный подложкодержатель и отработанная методика осаждения позволили сохранить целостность подложки в рассматриваемых условиях. На рис. 4 представлены характерные СЭМ-изображения алмазных покрытий с различным увеличением. На подложках образовалось сплошное покрытие из кристаллов различной структуры и размеров. Заметим, что концентрация метана в подаваемой смеси оказывает существенное влияние на формирование кристаллов. Рост расхода Q метана с 80 до 120 н.см³/мин привел к значительному увеличению размеров кристаллов (средние размеры кристаллов в центральной области осаждения увеличились с 13 до 35 мкм). Дальнейшее увеличение расхода метана не привело к увеличению размеров кристаллов алмаза: при расходе метана $Q = 160$ н.см³/мин средние размеры кристаллов в центральной области осаждения составили 28 мкм, а при $Q = 200$ н.см³/мин — 18 мкм. Заметим, что при расходе метана $Q = 200$ н.см³/мин поверхность крупных кристаллов покрыта более мелкими частицами, которые, вероятно, являются ультрадисперсными зародышами алмазной фазы.

На рис. 5, где приведены КРС-спектры (зависимость интенсивности I излучения поверхности образцов от частоты), имеется линия с волновым числом $\nu = 1330$ см⁻¹, свидетельствующая о наличии алмазного покрытия во всех четырех образцах. Представленные спектры показывают, что добавление аргона и использование газоструйного метода позволяют получать качественные алмазные покрытия при расходе метана, составляющем 1–2 % расхода водорода.

Для оценки скорости роста проведены измерения размеров кристаллов и толщины осажденного покрытия. Измерение толщины алмазных покрытий проводилось с помощью толщиномера “TESA DIGICO 10”, имеющего погрешность 2 мкм. На рис. 6 представлены зависимости максимального размера S кристаллов и максимальной толщины H покрытия в образцах от расхода подаваемого метана. Видна корреляция между размерами кристалла и толщиной осажденного покрытия. Далее под скоростью синтеза алмазов будем понимать изменение толщины покрытия. Наименьшая скорость синтеза достигнута при расходе метана $Q = 80$ н.см³/мин, наибольшая — при $Q = 120$ н.см³/мин, при остальных значениях расхода метана скорости синтеза близки.

В работе [21] с помощью газоструйного метода было синтезировано алмазное покрытие на кремниевых подложках со скоростью 20 мкм/ч, вычисленной по размеру кристалла, поскольку сохранность подложки при использовании ранее созданной конструкции подложкодержателя удалось обеспечить только в “слабом” режиме осаждения: расходы водорода и метана составляли 7000 и 70 н.см³/мин соответственно, давление в камере осаждения — 40 торр, температура подложки — около 1300 К. В работе [17] получена скорость осаждения алмазного покрытия 200 мкм/ч на молибденовой подложке при расходе метана 160 н.см³/мин при более высокой температуре подложки. Заметим, что температура подложки оказывает значительное влияние на морфологию алмазных пленок [18].

Достигнутая в экспериментах скорость синтеза алмазов значительно превышает скорость [11, 12, 21], полученную с помощью газоструйного метода в близких условиях из смеси водорода с метаном. Таким образом, добавление аргона приводит к существенному увеличению скорости синтеза алмазного покрытия без снижения его качества.

Заключение. В работе развивается газоструйный метод синтеза алмазных покрытий из активированной в СВЧ-разряде смеси газов-предшественников, включающей водород, метан и аргон. Одной из особенностей газоструйного метода является нагрев подложек струей активированного газа, что ограничивает возможности синтеза алмазных пленок на

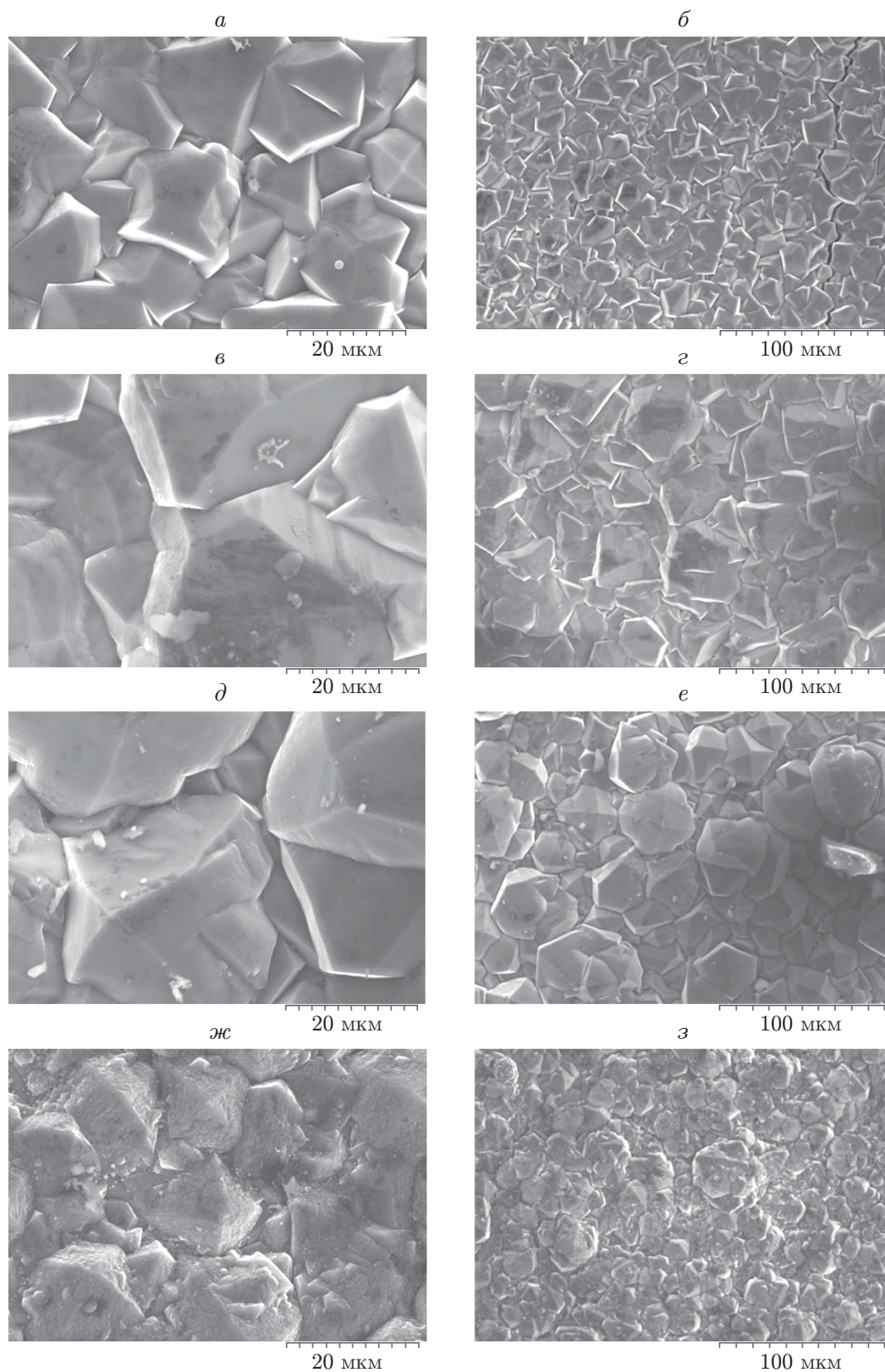


Рис. 4. СЭМ-фотографии с разным увеличением образцов, полученных при различном расходе метана:

а, б — $Q = 80 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, *в, г* — $Q = 120 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, *д, е* — $Q = 160 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, *ж, з* — $Q = 200 \text{ н.см}^3/\text{мин}$

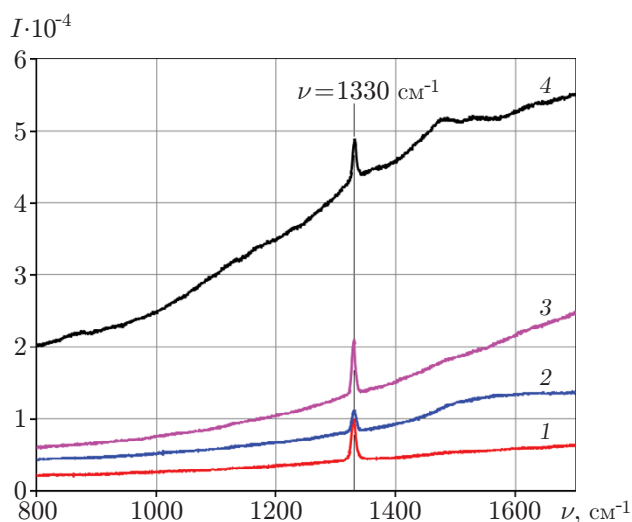


Рис. 5. КРС-спектры излучения поверхности образцов, полученных при различных расходах метана:

1 — $Q = 80 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, 2 — $Q = 120 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, 3 — $Q = 160 \text{ н.см}^3/\text{мин}$, 4 — $Q = 200 \text{ н.см}^3/\text{мин}$

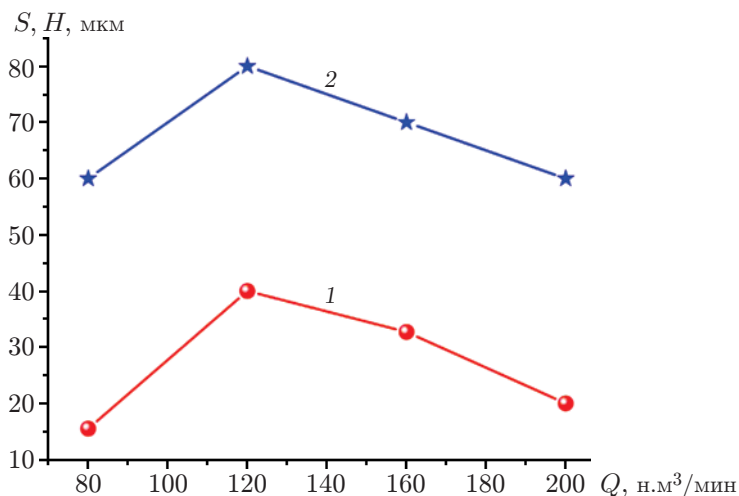


Рис. 6. Зависимости максимального размера кристаллов S (1) и максимальной толщины покрытия H (2) от расхода подаваемого метана

термически нестойких материалах с низкой теплопроводностью. Наличие аргона в смеси газов-предшественников приводит к увеличению температуры газа в разряде, что соответственно оказывает влияние на состав активированной смеси газов, истекающей в камеру осаждения. В частности, увеличивается доля атомарного водорода. Вследствие этого наличие аргона позволяет увеличить скорость синтеза алмазных покрытий. Однако увеличение температуры активированного газа и количества атомарного водорода приводит к увеличению теплового воздействия на подложку. Для решения проблемы теплоотвода от подложки были разработаны конструкция подложкодержателя и методика, позволяющие сохранять целостность подложки и поддерживать необходимую температуру ее поверхности в рассматриваемых условиях газоструйного осаждения.

Получен ряд образцов алмазных покрытий на подложках из карбидизированного кремния при использовании смесей с различной концентрацией метана. Полученные образцы исследовались с помощью методов сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Проведенный газоструйный синтез из смеси водород — аргон — метан позволил получить алмазные покрытия со скоростью роста до 160 мкм/ч, что существенно больше, чем при использовании метановодородной смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. **May P. W.** Diamond thin films: a 21st-century material // *Philos. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A*. 2000. V. 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.** Алмазные CVD-покрытия режущих инструментов (обзор) // *Успехи прикл. физики*. 2015. Т. 3, № 4. С. 342–376.
4. **Vikharev A. L., Gorbachev A. M., Lobaev M. A., Radishev D. B.** Multimode cavity type MPCVD reactor for large area diamond film deposition // *Diamond Relat. Materials*. 2018. V. 83. P. 8–14.
5. **Tallaire A., Achard J., Silva F., et al.** Growth of large size diamond single crystals by plasma assisted chemical vapour deposition: Recent achievements and remaining challenges // *C. R. Physique*. 2013. V. 14. P. 169–184.
6. **Butler J. E., Mankelevich Y. A., Cheesman A., et al.** Understanding the chemical vapor deposition of diamond: recent progress // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2009. V. 21. 364201.
7. **Ralchenko V. G., Inyushkin A. V., Shu Guoyang, et al.** Thermal conductivity of diamond mosaic crystals grown by chemical vapor deposition: Thermal resistance of junctions // *Phys. Rev. Appl.* 2021. V. 16. 014049.
8. **Bolshakov A. P., Ralchenko V. G., Yurov V. Y., et al.** High-rate growth of single crystal diamond in microwave plasma in CH₄/H₂ and CH₄/H₂/Ar gas mixtures in presence of intensive soot formation // *Diamond Relat. Materials*. 2016. V. 62. P. 49–57.
9. **Ребров А. К., Исупов М. В., Литвинцев А. Ю., Буров В. Ф.** Синтез алмазов из микроволновой плазмы с использованием сверхзвуковых потоков газа // *ПМТФ*. 2018. Т. 59, № 5. С. 5–12.
10. **Rebrov A. K., Bobrov M. S., Emelyanov A. A., et al.** Experience in the synthesis of diamond from a supersonic microwave plasma jet // *Interfacial Phenomena Heat Transfer*. 2019. V. 7, N 2. P. 131–137.
11. **Ребров А. К., Емельянов А. А., Плотников М. Ю. и др.** Синтез алмаза из высокоскоростного потока СВЧ-плазмы // *Докл. АН. Техн. науки*. 2020. Т. 490, № 1. С. 48–51.
12. **Emelyanov A. A., Pinaev V. A., Plotnikov M. Yu., et al.** Effect of methane flow rate on gas-jet MPCVD diamond synthesis // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2022. V. 55. 205202.
13. **Ребров А. К., Емельянов А. А., Плотников М. Ю. и др.** Влияние расхода смеси газов на процесс синтеза алмаза из высокоскоростного потока сверхвысокочастотной плазмы // *ПМТФ*. 2020. Т. 61, № 5. С. 158–167.
14. **Емельянов А. А., Плотников М. Ю., Ребров А. К. и др.** Использование сверхзвуковой струи газа, активированного в микроволновом разряде, для осаждения алмаза // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2021. № 1. С. 106–114.
15. **Hrebtov M. Yu., Bobrov M. S.** Numerical optimization of hydrogen microwave plasma reactor for diamond film deposition // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1359. 012010.

16. Емельянов А. А., Пинаев В. А., Плотников М. Ю. и др. Оптические и газодинамические измерения в потоке плазмы СВЧ-разряда в условиях газоструйного синтеза алмаза // ПМТФ. 2022. Т. 63, № 3. С. 54–61.
17. Емельянов А. А., Пинаев В. А., Плотников М. Ю. и др. Влияние аргона на газоструйный синтез алмазных покрытий из смеси $H_2 + CH_4 + Ar$, активированной в СВЧ-разряде // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 3. С. 417–426.
18. Федосеева Ю. В., Городецкий Д. В., Макарова А. А. и др. Влияние температуры молибденовых подложек на строение алмазных покрытий, полученных методом газофазного осаждения из высокоскоростного потока СВЧ-плазмы // Журн. структур. химии. 2021. Т. 62, № 1. С. 157–166.
19. Ребров А. К. Возможности газофазного синтеза алмазных структур // Успехи физ. наук. 2017. Т. 187, № 2. С. 193–200.
20. Ребров А. К., Емельянов А. А., Пинаев В. А. и др. Газоструйный синтез алмазных покрытий из смеси $H_2 + CH_4 + Ar$, активированной в СВЧ-разряде // Докл. РАН. Физика, техн. науки. 2022. Т. 505, № 1. С. 45–49.
21. Emelyanov A. A., Plotnikov M. Yu., Timoshenko N. I., Yudin I. B. Effective cooling of substrates with low thermal conductivity under conditions of gas-jet MPCVD diamond synthesis // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2119, N 1. 012119.
22. Borges C. F. M., Schelz S., Martinu L., Moisan M. Adhesion of CVD diamond films on silicon substrates of different crystallographic orientations // Diamond Relat. Materials. 1996. V. 5. P. 1402–1406.
23. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. М.: Наука, 1972.

*Поступила в редакцию 24/V 2023 г.,
после доработки — 1/VI 2023 г.
Принята к публикации 26/VI 2023 г.*
