

В. В. ГЛАДКОВСКИЙ, Е. Г. КОСТИН, Б. П. ПОЛОЗОВ, к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ, к. ф.-м. н. В. А. ПЕТРЯКОВ

Украина, г. Киев, Институт ядерных исследований НАН Украины

E-mail: oafedorovich@kinr.kiev.ua

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЧ-РАЗРЯДА И ПАРАМЕТРОВ НАГРЕВАТЕЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОДЛОЖКИ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ «АЛМАЗ» ДЛЯ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК

Представлены результаты исследований влияния на температуру подложки параметров высокочастотного разряда в плазмохимическом реакторе «Алмаз», разработанном и изготовленном в Институте ядерных исследований. Определено время выхода на равновесную температуру подложки при различных параметрах ВЧ-разряда и параметрах основного нагревателя. Установлено, что в условиях данного исследования при температурах подложки выше 600°C влияние ВЧ-разряда на повышение ее температуры практически отсутствует.

Ключевые слова: углеродные алмазоподобные пленки, плазмохимический реактор, подложка, температура нагрева.

Под алмазными и алмазоподобными пленками (АП и АПП) понимают такие структуры, которые состоят из атомов углерода как с алмазными (sp^3), так и с графитоподобными (sp^2) связями. Как известно, алмаз сочетает в себе уникальные свойства: высокую атомную плотность; большую ширину запрещенной зоны; низкую диэлектрическую проницаемость; высокую химическую стойкость; низкий коэффициент трения; высокую износостойкость; коррозионную устойчивость и т. п. Оптические свойства являются одними из самых интересных физических свойств данных структур: это и широкий спектральный диапазон оптического пропускания излучений, и необычно высокий показатель преломления (2,419 при длине волны 589 нм). Такие характеристики в сочетании с экстремальными свойствами АП и АПП (твердость, высокой теплопроводностью и химической стойкостью) представляют несомненный интерес для их использования [1]. Высокая устойчивость алмаза при тепловых нагрузках до 800–1000°C обуславливается величиной коэффициента линейного расширения в 5–10 раз меньшей, чем у других материалов [2].

Уникальное сочетание указанных физико-химических свойств АП и АПП стимулировало их широкое использование в различных областях науки и техники, в том числе и в области электроники, где АП и АПП используются для создания газовых сенсоров, диодов и транзисторов [3], детекторов частиц и датчиков излучений [4].

Интерес к использованию АП и АПП послужил стимулом к развитию целого ряда плазменных технологий их получения, которые описаны в [5–10]. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Для создания четкой

теории механизма роста АП и АПП продолжают развиваться не только новые методы и технологии их получения, но и методики анализа.

Структура и характеристики осаждаемых материалов определяются следующими параметрами: энергией осаждаемых частиц; химическим составом плазмы; температурой подложки; состоянием ее поверхности; давлениями рабочих газов и их соотношением [11]. Структура таких пленок и соотношение в них (sp^3)- и (sp^2)-связей определяются температурой подложки [12].

Снижение температуры подложки приводит к уменьшению размеров осаждаемых кристаллов и способствует образованию аморфного углерода или графита, массовая доля которого может значительно превышать долю алмазной фракции [13]. При 1400°C в вакууме или инертной атмосфере начинается заметная поверхностная графитизация, что недопустимо при нанесении алмазных пленок [14, с. 40]. Поэтому для получения АПП температура поверхности подложки, как правило, поддерживается в диапазоне от 400 до 1100°C в зависимости от видов и параметров разрядов. Для получения алмазных пленок наиболее типичными значениями температуры являются 700–1000°C [15, 16]. В указанном температурном диапазоне на поверхности подложки происходят явления, приводящие к росту на ней алмазных наноструктур [7, 17]. При температурах выше этого диапазона происходит графитизация с последующим разрушением структур. Таким образом, как показано в [15–19], получение алмазных структур возможно в достаточно узком диапазоне температуры подложки.

В [19] представлены данные по зависимости скорости роста алмазных пленок от температуры для разных значений тока разряда. Для каждого из выделенных интервалов тока разряда ско-

рость роста алмаза имеет свою зависимость от температуры подложки. Для достижения максимальной скорости синтеза алмазных покрытий и определения оптимальных условий ведения процесса необходимо учитывать как электрические параметры разряда, так и температуру подложки.

Несмотря на то, что плазменные технологии получения АП успешно развиваются, все же остается много неясных технологических моментов. При этом одним из важнейших вопросов является влияние параметров и условий разряда на температуру нагрева подложки в плазмохимическом реакторе (ПХР) для синтеза алмазных пленок в процессе его работы.

Целью данной работы является изучение влияния параметров плазмы высокочастотного разряда в управляемом магнитном поле, а также конструкции нагревателя на температуру подложки в ПХР.

Методика эксперимента

Исследования проводились на плазмохимическом реакторе «Алмаз» (рис. 1), который был разработан, сконструирован и изготовлен в Отделе физики плазменных технологий Института ядерных исследований НАН Украины.

Реактор состоит из прямоугольного корпуса 1, изготовленного из немагнитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Плазма «зажигается» в газовой смеси между активным 4 и заземленным 3 электродами высокочастотным (ВЧ) напряжением частотой 13,56 МГц. Смесь газов поступает в камеру реактора из системы напуска газа 9. Плазма находится в управляемом магнитном поле, которое образуется четырьмя магнитными катуш-

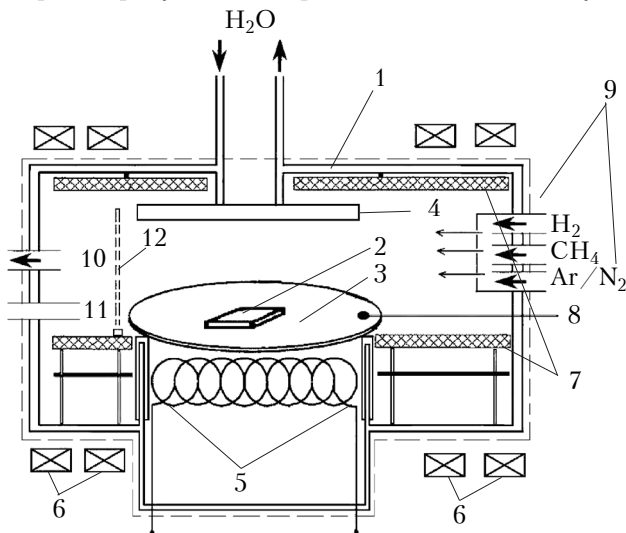


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
 1 — корпус; 2 — подложка; 3 — держатель подложки (заземленный электрод); 4 — активный электрод; 5 — нагреватель; 6 — магнитные катушки; 7 — плавающие электроды; 8 — измеритель температуры (термопара); 9 — системы напуска газа; 10 — система откачки; 11 — вакуумметр; 12 — плазмогаситель

ками 6 и направлено перпендикулярно электрическому полю ВЧ-разряда. Для предотвращения пробоя ВЧ-разряда на корпус реактора и получения нужной полярности потенциала смещения на подложкодержателе используются два металлических плавающих электрода 7, которые изолированы как от заземленного электрода, так и один от другого. Неиспользованные газы и продукты плазмохимических реакций удаляются из камеры ПХР через систему откачки газов 10. Необходимая температура подложки 2 обеспечивается путем подогрева ее держателя 3 диаметром 110 мм с помощью специального нагревателя 5, который представляет собой молибденовую спираль, подключенную к регулируемому источнику питания переменного тока. С помощью регулятора напряжения и разделительного трансформатора получали ток нагрева до 21 А при напряжении питания до 40 В. Спираль изолирована как от держателя подложки, так и от корпуса теплового отражателя. Держатель подложки нагревается за счет инфракрасного излучения и частичной термоэлектронной эмиссии с поверхности молибденовой спирали.

Контроль температуры обеспечивается хромель-алюмелевой термопарой 8. Для предотвращения попадания плазмы в систему откачки используется плазмогаситель 12, изготовленный в виде жалюзи из немагнитной нержавеющей стали. Контроль вакуума в разрядной камере проводится с помощью ионизационно-термопарного вакуумметра ВИТ-3 11. Температура держателя подложки измеряется также с помощью оптического пирометра ОППИР-09, хотя при наличии разряда в камере ПХР это весьма затруднительно из-за интенсивного излучения из объема плазмы, образующейся при ВЧ-разряде в управляемом магнитном поле.

В ходе выполнения исследований были решены проблемы, отмеченные в [6], а именно: нагрев термопары как за счет скинирования ВЧ-тока по ее поверхности, так и за счет электромагнитных наводок; запыление токопроводящим углеродом торцов изоляции. Первая проблема была решена путем экранирования поверхности термопары металлической пластинкой в точке измерения и расположением подводов в изоляции из фарфоровой полый трубки под плавающими электродами. Использование двойной внешней изоляции термопары позволило устранить запыление торцов. ВЧ-наводки на измеритель термо-ЭДС устранялись благодаря последовательному подключению с термопарой индуктивностей к каждому проводу термопары и параллельному подключению к миллиамперметру керамического конденсатора.

Более подробно режимы работы установки представлены в [20]. Результаты физических исследований алмазных пленок, полученных на приведенной установке, описаны в [20, 21].

**Результаты исследований
и их обсуждение**

Исследование температуры держателя подложки проводилось в следующих режимах: без разряда, когда температура менялась за счет регулирования тока молибденовой спирали нагревателя, и при наличии разряда, с подогревом и без подогрева держателя подложки.

Известно, что при нагреве держателя подложки при постоянном значении тока в нагревательной спирали существует время установления равновесной температуры. На **рис. 2, а** представлены результаты исследований процесса установления равновесной температуры держателя подложки для нашей конструкции ПХР при токе в молибденовой спирали нагревателя $I_n=10$ А при давлении $6 \cdot 10^{-2}$ Торр. Отсюда видно, что в условиях отсутствия разряда для достижения равновесной температуры держателя необходимо не менее 40 мин. Причинами такой инерционности процесса прогрева могут быть низкий коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен держатель подложки (нержавеющая сталь); слабая эффективность передачи тепла в вакууме от молибденовой спирали (в основном — за счет лучистого

прогрева); большая масса держателя подложки. Нагрев происходит за счет инфракрасного излучения, и определенные потери тепла при передаче от спирали к держателю все же происходят, несмотря на наличие двух коаксиальных теплоотражателей из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

На **рис. 2, б** представлены результаты исследований времени выхода на равновесную температуру при нагреве держателя только за счет разряда (без использования нагревателя). Ток разряда I_p составлял 7 А, напряженность магнитного поля 400 А/м, мощность ВЧ-генератора 1 кВт. Как видно из рисунка, время установления равновесной температуры в этом случае возрастает до 70 мин.

Также было проведено исследование зависимости температуры держателя от тока накала нагревателя с целью построения эталонной кривой для сравнения с температурой держателя при наличии разряда. При измерениях рабочее давление в ПХР составляло $6 \cdot 10^{-2}$ Торр. Из представленной на **рис. 3, а** зависимости (кривая 1) видно, что температура держателя подложки возрастает практически линейно с увеличением тока и при $I_n=16$ А достигает 630°C .

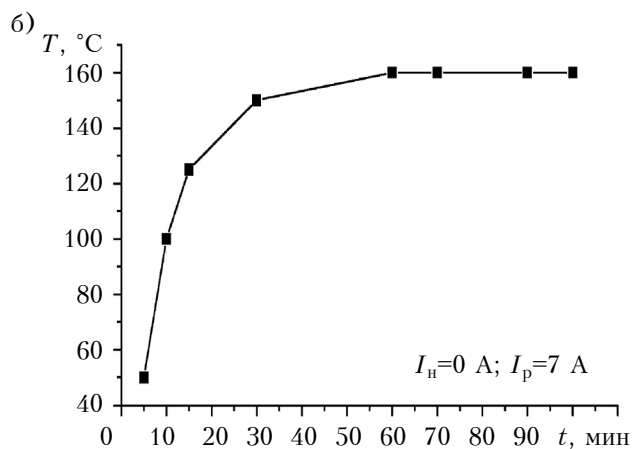
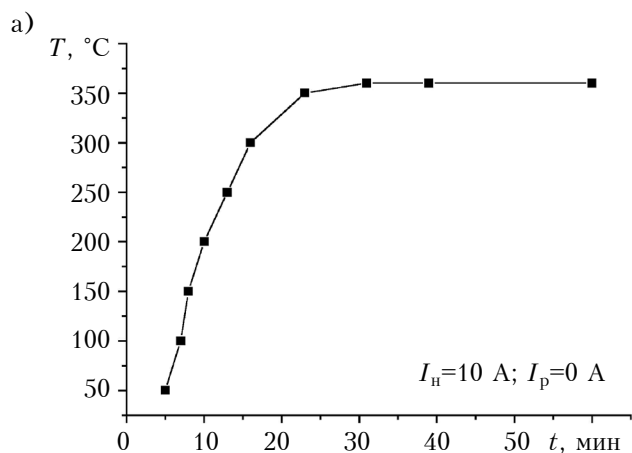


Рис. 2. Временная характеристика установления равновесной температуры держателя подложки при его нагреве только за счет накала спирали (а) или ВЧ-разряда (б)

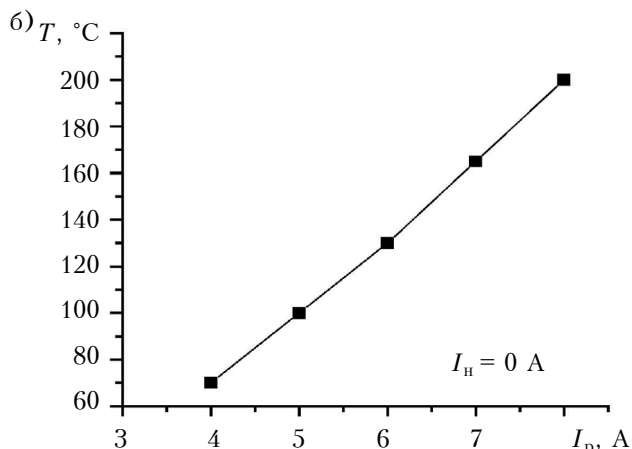
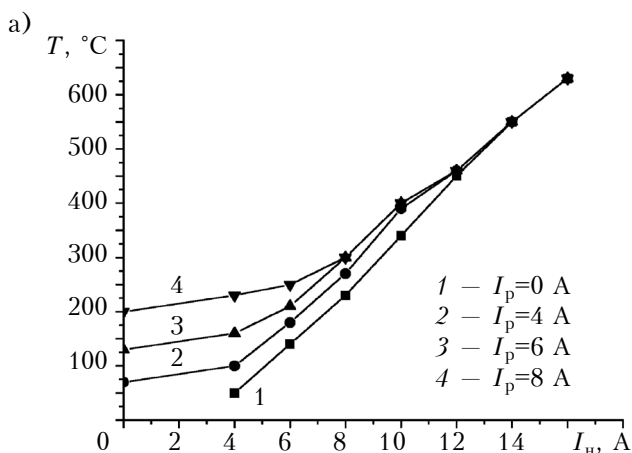


Рис. 3. Зависимость температуры держателя подложки от тока накала нагревателя при разном токе разряда (а) и от тока разряда в отсутствие тока накала (б)

Результаты исследований нагрева держателя подложки за счет плазмы ВЧ-разряда представлены на рис. 3, б. Полученная зависимость так же, как и кривая 1 на рис. 3, а, практически линейная, однако температура держателя достигает всего 200°C при $I_p=8$ А и мощности ВЧ-генератора 1 кВт.

Зависимости температуры держателя от тока накала нагревателя при наличии ВЧ-разряда представлены на рис. 3, а (кривые 2–4) вместе с полученными в условиях нагрева без разряда (кривая 1). Здесь видно, что при малых значениях тока нагревателя I_n температура держателя подложки низкая и пропускание разряда приводит к достаточно сильному его нагреву. С увеличением I_n кривые сближаются, т. е. преобладающим становится влияние мощности спирали. При достижении I_n значения примерно 10 А вклад разряда плазмы в повышение температуры держателя становится незначительным, а далее — уже практически незаметным.

Следует отметить, что держатель подложки все-таки можно нагреть до 1000°C с помощью молибденовой спирали большей длины. Это, однако, сопровождается рядом существенных проблем. Во-первых, ток в спирали при этом достигает 21 А (рис. 4, кривая 1). Кроме того, увеличение длины спирали приводит к росту падения напряжения на ней (соответственно, к большей вероятности пробоя при низком давлении в реакторе) и к увеличению ее сопротивления, т. е. растет мощность, выделяемая спиралью, а значит, и поток тепла на держатель подложки. В то же время, при больших значениях тока весьма затруднительно в течение длительного времени проводить охлаждение подводных электродов, что вызывает еще одну проблему: несмотря на то, что молибден является одним из наиболее стойких в водородной среде материалов, открытая молибденовая спираль, взаимодействуя с водородом при высокой температуре, постепенно

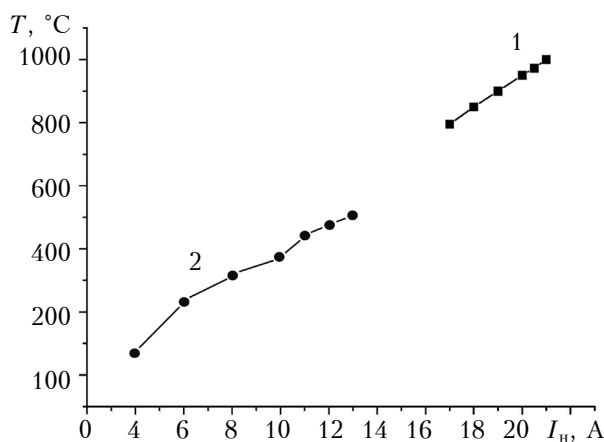


Рис. 4. Зависимости температуры держателя подложки от тока нагревателя из молибденовой спирали увеличенной длины (1) и плоского нагревателя из фехрелевой фольги (2)

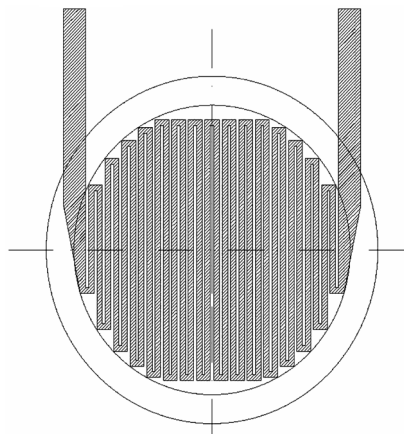


Рис. 5. Конструкция держателя подложки с плоским нагревателем из фехрелевой фольги

утоняется, меняются ее параметры, и в результате она выходит из строя. Срок службы молибденовой спирали при температурах около 1000°C составляет всего несколько месяцев.

В связи с указанными проблемами была предпринята попытка создать новый нагреватель с достаточно большим сроком службы, который позволил бы свести к минимуму тепловые потери и получить температуру в пределах 700–1000°C [18]. В разработанной конструкции (рис. 5) нагревательный элемент, изготовленный из фехрелевой фольги толщиной 50 мкм, находится в контакте с держателем подложки из немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т через высокотемпературную керамику марки 22ХС (ВК94-1). Предполагалось, что это позволит уменьшить количество потерь на тепловое излучение и уменьшить время выхода температуры держателя подложки на равновесное значение.

Во избежание пробоя с нагревателя на заземленные участки установки при напряжении выше 50 В он был выполнен с сопротивлением 3 Ом. Максимальная температура поверхности держателя, которую удалось получить с помощью такого нагревателя при токе нагрева 15 А и падении напряжения на нем 45 В, составила 550°C (см. рис. 4, кривая 2). При дальнейшем увеличении тока произошло расслоение фольги и ее перегорание. Следует отметить, что использование нихромовой фольги вместо фехрелевой также не даст необходимой для получения алмазных пленок температуры подложкодержателя, поскольку максимальные значения рабочих температур нихрома и фехраля не столь значительно отличаются между собой — 1100 и 1000°C, соответственно [22]. Заменить фехрелевую фольгу на молибденовую не представляется возможным, т. к. удельное сопротивление молибдена в 20 раз ниже удельного сопротивления фехраля и нихрома [22]. В таком случае для нагрева подложкодержателя до высоких температур необходим ток более 300 А, что достаточно тяжело обеспечить технически из-за необходимости охлаждения подводных проводов и, особенно, высокоточных вакуумных вводов.

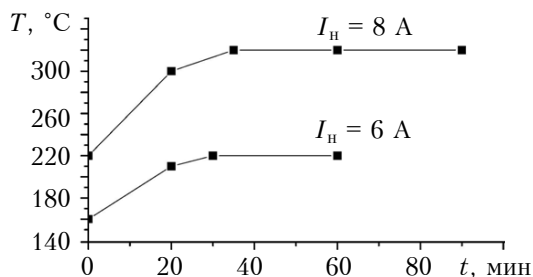


Рис. 6. Временная характеристика установления равновесной температуры держателя подложки для нагревателя из фехралевой фольги при разных токах нагрева

Существенно увеличить скорость прогрева держателя подложки с помощью разработанного нагревателя также не удалось (рис. 6) — его равновесную температуру можно достичь не менее чем за 25–30 мин, что, по-видимому, связано с низкой теплопроводностью материала держателя подложки.

Однако, несмотря на сказанное, фехралевые нагреватели предложенной конструкции могут быть использованы для получения более низких температур, необходимых, например, для получения пористого кремния, нитрида титана и других соединений [23].

Заключение

Представленные результаты исследований позволяют заключить следующее.

1. При температуре 600 °C и более прогрев подложки под действием плазмы в сравнении с нагревом от подложкодержателя незначителен и им можно пренебречь.

2. Для предотвращения формирования не алмазных, а алмазоподобных углеродсодержащих образований необходимо учитывать инерционность нагрева держателя подложки; процесс нанесения алмазных пленок следует проводить только после достижения стабильного значения необходимой температуры подложки.

3. Нагреватель из фехралевой фольги позволяет получить температуру подложки не выше 550 °C.

4. При использовании молибденовой проволоки можно нагреть держатель подложки до 1000 °C, однако в водородной среде длительность службы такого нагревателя небольшая и при максимальной температуре составляет несколько месяцев при ежедневной работе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Cline B.L., Olson J.M. CVD diamond solutions for machining and other mechanical applications // *Diamond films handbook* / Ed. by J. Asmussen, D. Reinhard. — New York: Marcel Dekker, 2002. — P. 403–490.
- Справочник: Физические свойства алмаза / Под. ред. Н.В. Новикова. — Киев: Наукова думка, 1987.
- Kobashi K., Yokota Y. R&D of diamond films in kobe steel // *Proc. of the Sixth Applied Diamond Conf. / Second Frontier Carbon Technology Joint Conf. (ADC/FCT 2001)*. — Auburn, Alabama USA. — 2001. — P. 24–30.

- Han S.K., McClure M.T., Wolden C.A. et. al. Fabrication and testing of a microstrip particle detector based on highly oriented diamond films // *Diamond&Related Materials*. — 2000. — Vol. 9. — P. 1008-1012.

- Довгань А.Н., Колесник В.П. Формирование алмазоподобных покрытий импульсными потоками плазмы // *Авиационно-космическая техника и технология*. — № 8. — Харьков, ХАИ. — 2008. — С. 21–25.

- Костін Є.Г., Полозов Б.П., Федорович О.А. та ін. Плазмохімічний синтез та фізичні дослідження нанорозмірних алмазоподібних плівок // *Зб. анотацій Української конференції з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу*. — Україна, м. Київ. — 2011. — С. 37.

- Калданов В.А. Исследование источников неравновесной плазмы на основе СВЧ разрядов, предназначенных для осаждения алмазных пленок / Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Россия, г. Нижний Новгород. — 2006.

- Кускова Н.И., Бакларь В.Ю. Процессы получения углеродных наноматериалов электроразрядными методами // *Матер. 14-й междунар. конф. «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах»*. — Украина, г. Николаев. — 2009. — С. 73–75.

- Пашнев В.К., Стрельницкий В.Е., Опалев О.А. и др. Осаждение алмазных покрытий с использованием тлеющего разряда, стабилизированного магнитным полем // *Физическая инженерия поверхности*. — 2003. — Т. 1, №1. — С. 49–55.

- Yacaman M. J., Yoshida, M. M., Rendon, R., Santiesteban J. G. Catalytic growth of carbon microtubules with fullerene structure // *Applied Physics Letters*. — 1993. — Vol. 62. — P. 202–204.

- Сыпченко И.А. О влиянии условий осаждения на структуру, фазовый состав и свойства алмазоподобных пленок углерода // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. — Харьков, ХАИ. — 2010. — Вып. 3. — С. 296-303.

- Рудченко С.О., Пуха В.Е., Стариков В.В. Влияние условий синтеза на структуру и свойства алмазоподобных углеродных пленок для ФЭП // *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна*. № 1019, серія «Фізика». — 2012. — Вип. 16. — С. 89–93.

- Черепанов В.А., Золкин А.С., Колесов Б.А., Мурзахметов К.Т., Семенов В.И. Алмазоподобные гранулированные пленки на кремнии, полученные при горении ацетилен [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://psj.nsu.ru/articles/paper5.html>

- Физический энциклопедический словарь. Т. 1 / Под ред. Андреева Н.Н. и др. — Москва: Сов. энциклопедия, 1960.

- Jackman R. B., Beckman J., Foord J. S. The growth of nucleation layers for high-quality diamond CVD from an r.f. plasma // *Diamond and related materials*. — 1995. — Vol. 4, iss. 5-6. — P. 735–739.

- Reineck I., Sjostrand M. E., Karner J., Pedrazzini M. Diamond coated cutting tools // *Int. J. of Refractory metals and Hard materials*. — 1996. — Vol. 14. — P. 187–193.

- Grotjohn T. A., Asmussen J. Microwave plasma-assisted diamond film deposition. Chapt. 7 // *In book: Diamond films handbook* / Eds. J. Asmussen, D. Reinhard. — New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 2002. — P. 211–300.

- Выровец И.И., Грицына В.И., Дудник С.Ф. и др. Нанокристаллические алмазные пленки: структура, свойства и перспективы применения // *Физическая инженерия поверхности*. — 2010. — Т. 8, № 1. — С. 4–19.

- Вережкин А.А., Выровец И.И., Грицына В.И. и др. Исследование влияния параметров синтеза алмазных покрытий на скорость их роста и величину удельного электрического сопротивления // *Вопросы атомной науки и техники*. — 2010. — № 1. — С. 104–107.

20. Максименко Л.С., Мищук О.Н., Матяш И.Е. и др. Модуляционная поляриметрия полного внутреннего отражения, нарушенного алмазоподобными пленками // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 1. — С. 3–8.

21. Костин Е.Г., Полозов Б.П., Федорович О.А. и др. Физические исследования наноразмерных алмазоподобных пленок // Труды 13-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, г. Одесса. — 2012. — С. 247.

22. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. — Москва: Наука, 1966.

23. Khodin A., Lee Joong-Kee, Kim Chang-Sam, Kim Sang-Ok. Amorphous nanocrystalline silicon plasma enhanced CVD grown on porous alumina substrate // 9th IEEE Conference on Nanotechnology. — Italy, Genoa. 2009. — P. 540–542.

Дата поступления рукописи
в редакцию 4.04 2014 г.

В. В. ГЛАДКОВСКИЙ, Е. Г. КОСТИН, Б. П. ПОЛОЗОВ, О. А. ФЕДОРОВИЧ,
В. О. ПЕТРЯКОВ

Україна, м. Київ, Інститут ядерних досліджень НАНУ

E-mail: oafedorovich@kinr.kiev.ua

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ВЧ-РОЗРЯДУ І ПАРАМЕТРІВ НАГРІВАЧА НА ТЕМПЕРАТУРУ ПІДКЛАДКИ В ПЛАЗМОХІМІЧНОМУ РЕАКТОРІ «АЛМАЗ» ДЛЯ СИНТЕЗУ ВУГЛЕЦЕВИХ АЛМАЗОПОДІБНИХ ПЛІВОК

Досліджено вплив на температуру підкладки параметрів ВЧ-розряду в плазмохімічному реакторі «Алмаз», розробленому і виготовленому в Інституті ядерних досліджень. Встановлено час виходу на рівноважне значення температури підкладки при різних параметрах ВЧ-розряду та параметрах основного нагрівача. Встановлено, що в умовах даного дослідження при температурах підкладки вище 600°C вплив ВЧ-розряду на підвищення її температури практично відсутній.

Ключові слова: вуглецеві алмазоподібні плівки, плазмохімічний реактор, підкладка, температура нагріву.

DOI: 10.15222/ТКЕА2014.5-6.39
UDC 535.5

V. V. HLADKOVSKIY, E. G. KOSTIN, B. P. POLOZOV,
O. A. FEDOROVICH, V. A. PETRIAKOV

Ukraine, Kiev, Institute for Nuclear Research of NASU

E-mail: oafedorovich@kinr.kiev.ua

THE INFLUENCE OF HF DISCHARGE PARAMETERS AND HEATER SETTINGS ON THE SUBSTRATE TEMPERATURE IN THE PLASMA-CHEMICAL REACTOR «ALMAZ» FOR THE SYNTHESIS OF DIAMOND-LIKE CARBON FILMS

The paper presents the research results on the device for obtaining diamond-like films from gas phase, constructed and tested in the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences.

The device is based on a high-frequency (HF) discharge (13,56 MHz) into controlled crossed magnetic and electric fields. The discharge is excited in H₂+CH₄ or H₂+CH₄+Ar mixtures in different proportions. Working pressure in the chamber is 10⁻¹–10⁻² Torr.

From the obtained results, the authors determine the time period for establishing of equilibrium substrate temperature at different HF discharge and main heater parameters. HF discharges, in the conditions of this study, at substrate temperatures above 600°C have virtually no influence on the temperature rise of the substrate. In addition, a new heater is proposed in order to increase the attainable temperature and reduce the time for establishing the equilibrium substrate temperature.

A fehral heater can not heat the substrate to temperatures above 650°C. A molybdenum wire as a material of the heater can ensure the substrate holder temperature above 1000°C in a hydrogen atmosphere, but it has a short lifespan of a few months at the maximum temperature under daily use.

Keywords: carbon diamond-like films, plasma chemical reactor, substrate, heating temperature.

REFERENCES

1. Cline B.L., Olson J.M. CVD diamond solutions for machining and other mechanical applications. *Diamond Films Handbook*, ed. by J. Asmussen, D. Reinhard, New York, Marcel Dekker, 2002, pp. 403-490.

2. *Spravochnik: Fizicheskie svoistva almaza* [Handbook: The physical properties of diamond]. Ed. by N.V. Novikov, Kiev, Naukova dumka, 1987, 187 p. (in Russian)

3. Kobashi K., Yokota Y. R&D of diamond films in kobe steel. *Proc of the Sixth Applied Diamond Conference/Second*

Frontier Carbon Technology Joint Conference (ADC/FCT 2001), 2001, pp. 24-30.

4. Han S.K., McClure M.T., Wolden C.A., Vlahovic B., Soldi A., Sitar S. Fabrication and testing of a microstrip particle detector based on highly oriented diamond films. *Diamond & Related Materials*, 2000, vol. 9, pp. 1008-1012.

5. Dovgan' A.N., Kolesnik V.P. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, iss. 8, pp. 21-25. (in Russian)

6. Kostin Ye.G., Polozov B.P., Fedorovich O.A., Matyash I.Ye., Serdega B.K., Savinkov G.K., Burdin V.V. *Zbirnyk anotatsii "Ukrains'ka konferentsiya z fizyky plazmy i KTS-2011"*, Ukraine, Kyiv, 2011, p. 37. (in Ukrainian)

7. Kaldanov V.A. *Issledovanie istochnikov neravnovesnoi plazmy na osnove SVCh razryadov, prednaznachennykh dlya osazhdeniyaalmaznykh plenok*. Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. [Investigation of non-equilibrium plasma sources based on microwave discharges intended for deposition of diamond films. Doct. diss.]. Nizhnii Novgorod, 2006. (in Russian)

8. Kuskova N.I., Baklar' V.Yu. *Mater. of XIV intern. konfer. "Fizika impul'snykh razryadov v kondensirovanykh sredakh"*. Ukraine. Nikolaev, 2009, p. 73. (in Russian)

9. Pashnev V.K., Strel'nitskii V.E., Opalev. O.A., Gritsyna V.I., Vyrovets I.I., Bizyukov Yu.A., Bryk V.V., Kolupaeva Z.I. *Physical Surface Engineering*, 2003, vol. 1, no 1, pp. 49-55. (in Russian)

10. Yacaman M. J., Yoshida, M. M., Rendon, R., Santiesteban J. G. Catalytic growth of carbon microtubules with fullerene structure. *Applied Physics Letters*, 1993, vol. 62, pp. 202-204.

11. Sypchenko I.A. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruytsii letatel'nykh aparatov*. Kharkov, KhAI, 2010, iss. 3, pp. 296-303. (in Russian)

12. Rudchenko S.O., Pukha V.E., Starykov V.V. *Visnyk V. N. Karazin Kharkiv National University*, N 1019, ser. "Fizika", 2012, iss. 16, pp. 89-93. (in Russian)

13. Cherepanov V.A., Zolkin A.S., Kolesov K.T., Murzakhmetov K.T., Semenov V.N. [Diamond-like film on the granular silicon produced by combustion of acetylene] Available at: <http://psj.nsu.ru/articles/paper5.html> (in Russian)

14. *Fizicheskii entsiklopedicheskii slovar'*. Tom. 1. [Physical encyclopedic dictionary Vol. 1]. Ed. by N. N. Andreeva et al. Moscow, 1960. (in Russian)

15. Jackman R. B., Beckman J., Foord J. S. The growth of nucleation layers for high-quality diamond CVD from an r.f. plasma. *Diamond and Related Materials*, 1995, vol. 4, iss. 5-6, pp. 735-739.

16. Reineck I., Sjostrand M. E., Karner J., Pedrazzini M. Diamond coated cutting tools. *Int. J. of Refractory metals and Hard materials*, 1996, vol. 14, pp. 187-193.

17. Grotjohn T. A., Asmussen J. Microwave plasma-assisted diamond film deposition. Ch. 7 in book *Diamond films handbook*. Ed. by J. Asmussen, D. Reinhard. New York, USA, Marcel Dekker, Inc., 2002, pp. 211-300.

18. Vyrovets I.I., Gritsyna V.I., Dudnik S.F., Opalev. O.A., Reshetnyak E.N., Strel'nitskii V.E. *Physical Surface Engineering*, 2010, vol. 8, no 1, pp. 4-19. (in Russian)

19. Verevkin A.A., Vyrovets I.I., Gritsyna V.I., Dudnik S.F., Kutny V.E., Opalev O.A., Rybka A.S., Strel'nitskij V.E. *Problems of atomic science and technology*, 2010, no 1, pp. 104-107 (in Russian)

20. Maksymenko L.S., Mishchuk O.N., Matyash I.E., Serdega B.K., Kostin E.G., Polozov B.P., Fedorovich O.A., Savinkov G.K. [Modulation polarimetry of full internal reflection, broken by diamond-like films]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi aparature*, 2013, no 1, pp. 3-8. (in Russian)

21. Kostin E.G., Polozov B.P., Fedorovich O.A., Matyash I.E., Serdega B.K., Savinkov G.K. *Proc. of the 13th International scientific-practical conference "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odessa, 2012, p. 247. (in Russian)

22. Koshkin N.I., Shirkevich M.G. *Spravochnik po elementarnoi fizike* [Handbook of elementary physics]. Moscow, Nauka, 1966, 248 p. (in Russian)

23. Khodin A., Lee Joong-Kee, Kim Chang-Sam, Kim Sang-Ok. Amorphous nanocrystalline silicon plasma enhanced CVD grown on porous alumina substrate. *Proc. of the 9th IEEE Conference on Nanotechnology*, Italy, Genoa, 2009, pp. 540-542.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Пістун Є. П., Стасюк І. Д. Основи автоматичної та автоматизації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014.

Книга присвячена основним принципам побудови систем автоматичного регулювання та керування. Висвітлено основні етапи розвитку техніки автоматизації. Розглянуто функційне призначення і наведено статичні та динамічні характеристики елементів систем автоматичного регулювання і керування. Наведено класифікацію регуляторів за законами регулювання. Описано будову і роботу регуляторів прямої дії та ізодромних регуляторів, основні властивості об'єктів регулювання та їхній вплив на характер процесу регулювання, а також вплив властивостей автоматичного регулятора на характер перехідного процесу в САР. Наведено спрощені інженерні методи вибору автоматичних регуляторів і розрахунку їхніх параметрів настроювання.

Призначена для студентів вищих технічних навчальних закладів. Буде корисним інженерно-технічним працівникам, які займаються розробкою та впровадженням систем автоматичного регулювання та керування.

