

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ И ТОКА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НА КИНЕТИКУ РОСТА ЛЕГИРОВАННЫХ АЗОТОМ НАНОСТРУКТУРНЫХ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ

В.И. Грицына, С.Ф. Дудник, К.И. Кошевой, О.А. Опалев,  
В.Е. Стрельницкий

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"*  
*Украина*

Поступила в редакцию 29.10.2012

Приведены экспериментальные результаты исследования влияния величины тока разряда и состава газовой фазы с относительно низким содержанием аргона на кинетику процесса синтеза в плазме тлеющего разряда легированных азотом наноструктурных алмазных покрытий. Показано, что, при введении азота в газовую фазу за счет соответствующего уменьшения концентрации водорода, скорость роста наноструктурных алмазных покрытий может как возрастать, так и уменьшаться в зависимости от соотношения концентраций компонент газовой фазы. Проведен анализ и сравнение полученных экспериментальных данных с имеющимися литературными данными по влиянию на кинетику процесса синтеза алмазных покрытий состава газовой фазы, мощности разряда (температуры).

**Ключевые слова:** алмазные покрытия, легирование азотом, наноструктура, кинетика роста, ток разряда, состав газовой фазы.

Наведено експериментальні результати дослідження впливу величини струму розряду і складу газової фази з відносно низьким вмістом аргону на кінетику процесу синтезу у плазмі тліючого розряду легованих азотом наноструктурних алмазних покриттів. Показано, що при введенні азоту в газову фазу за рахунок відповідного зменшення концентрації водню швидкість росту наноструктурних алмазних покриттів може як зростати, так і зменшуватися в залежності від співвідношення концентрацій компонент газОВОЇ фази. Проведено аналіз і порівняння отриманих експериментальних даних з наявними літературними даними по впливу на кінетику процесу синтезу алмазних покриттів складу газової фази, потужності розряду (температури).

**Ключові слова:** алмазні покриття, легування азотом, наноструктура, кінетика росту, струм розряду, склад газової фази.

The experimental results of investigations of the influence of the discharge current value and composition of the gas phase with a relatively low content of argon on the kinetics of the synthesis process in glow discharge plasma of nitrogen-doped nanostructured diamond coatings have been discussed. It was shown that under feeding of nitrogen into the gas phase by a corresponding decrease of hydrogen concentration the growth rate of nanostructured diamond coatings can increase or decrease depending on the relative concentrations of the gas phase components. The analysis and comparison of the experimental data with the available literature data of the gas phase composition, the discharge power (temperature) on the kinetics of diamond coating synthesis have been performed.

**Keywords:** diamond coatings, nitrogen doping, nanostructure, kinetics of coatings grows, discharge current, gas phase composition.

### ВВЕДЕНИЕ

Наноструктурные легированные азотом алмазные покрытия и пленки, в отличие от не легированных азотом, обладают электрической проводимостью. Наличие электрической проводимости расширяет возможности практического использования алмазных материалов, в том числе, в наноструктурном состоянии [1, 2].

Для получения алмазных покрытий в наноструктурном состоянии в водород-метановую смесь, используемую при синтезе обычных поликристаллических алмазных покрытий, дополнительно вводят инертный газ [1]. Как показали исследования, уменьшение концентрации водорода за счет введения в газовую смесь инертного газа изменяет соотношение скорости роста уже сформированных алмазных зерен в покрытии и скорости

образования новых алмазных зародышей вплоть до значения, при котором размеры зерен в процессе роста покрытия уже не могут превысить нанометровой величины. В большинстве случаев, в качестве инертного газа используют аргон. При использовании наиболее распространенных методов активации газовой фазы с помощью СВЧ разряда или горячей нити для получения алмазных покрытий в наноструктурном состоянии уменьшают количество водорода в газовой смеси за счет аргона до уровня не более 10–20 об.% и даже вплоть до 0% [3–5].

Заметное увеличение электрической проводимости наноструктурных алмазных покрытий наблюдается при введении в газовую фазу азота в количестве от ~5–10 об.% до ~20–25 об.% [6–7], которое превышает значения концентрации водорода, используемые в большинстве случаев при синтезе наноструктурных алмазных покрытий. Поэтому при синтезе легированных азотом наноструктурных алмазных покрытий, как правило, концентрацию водорода в газовой фазе не изменяют, а азот вводят за счет соответствующего уменьшения количества аргона. Изменяя таким образом содержание азота в газовой фазе, изучалось его влияние на кинетику, структуру и другие свойства наноструктурных алмазных покрытий [7–11].

Нами было установлено, что если проводить синтез алмазных покрытий в плазме тлеющего разряда в скрещенных  $E/H$  полях, то формирование наноструктурных алмазных покрытий возможно уже при концентрации аргона в газовой фазе на уровне ~40% [12]. В этой связи, представляется возможным исследовать влияние азота на процесс синтеза наноструктурных алмазных покрытий в достаточно широком диапазоне изменения его концентрации за счет соответствующего изменения концентрации водорода, а не только аргона. Такие исследования представляют интерес как с практической стороны при получении наноструктурных легированных азотом алмазных покрытий, так и с точки зрения получения дополнительных экспериментальных данных для более детального выяснения закономерностей влияния азота на процессы формирования алмазных покрытий, что и по-

служило основанием для проведения данной работы.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез нанокристаллических легированных азотом алмазных покрытий осуществляли на оборудовании, описанном в работе [13]. Покрытия наносились на подложки из монокристаллического кремния размерами ~7×7 мм<sup>2</sup> и толщиной 0,33 мм. Перед нанесением покрытия для создания на поверхности подложки первичных центров кристаллизации алмазной фазы их поверхность подвергалась механической обработке порошком ультра дисперсного алмаза.

Как следует из работ [6, 7, 14], при легировании азотом алмазных покрытий их электропроводимость заметно увеличивается с ростом концентрации азота в газовой фазе в диапазоне значений от ~5% до 25–40%. Дальнейшее увеличение концентрации азота уже слабо сказывалось на величине их электропроводимости. В данной работе состав газовой фазы был выбран таковым, чтобы имелась возможность изменять концентрацию азота примерно в таком же диапазоне, как и в упомянутых выше работах [6, 7, 14]. В соответствии с этим, концентрация аргона в газовой фазе в большинстве экспериментов составляла 60%. Остальные 40% приходились на долю азота, водорода и метана в разных соотношениях. Часть экспериментов проведена при концентрации аргона в газовой фазе 75%. Общее давление и скорость подачи смеси газов в процессе синтеза алмазных покрытий были неизменными и составляли, соответственно, 8·10<sup>3</sup> Па и 300 см<sup>3</sup>/мин.

Диапазон изменения тока тлеющего разряда выбирался из условия обеспечения нагрева подложек до температуры в интервале ~1100–1300 К, в котором при синтезе алмазных покрытий в плазме тлеющего разряда из газовых смесей, близких по составу к исследуемым в данной работе, нами ранее получались покрытия в наноструктурном состоянии [15]. В данной работе температура подложки измерялась, как и в работе [15], оптическим пирометром “Промінь”; диапазон изменения тока тлеющего разряда находился в пределах от ~3,5 А до ~5,5 А.

Исследование влияния состава газовой фазы на скорость роста наноструктурных покрытий проводили при токе тлеющего разряда 4,5 А. Скорость роста алмазных покрытий определяли на основе данных по изменению веса образца на единицу площади подложки за время проведения эксперимента. Вес образцов до и после нанесения алмазного покрытия определяли на весах ВЛР-20. Время нанесения алмазного покрытия для большинства экспериментов составляло 5 часов. В зависимости от параметров осаждения толщина полученных покрытий находилась в пределах от ~1 до 7 мкм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

К числу основных параметров, которые влияют на кинетику роста алмазных пленок, относятся состав газовой фазы и температура их синтеза. Температура подложки при использовании для активации газовой фазы того или иного типа газового разряда, в большинстве случаев, изменяется за счет изменения его мощности. На рис. 1 приведены зависимости скорости роста алмазных покрытий от концентрации метана для разных значений концентрации азота в газовой фазе при мощности разряда ~2,3 кВт; ток разряда составлял 4,5 А.

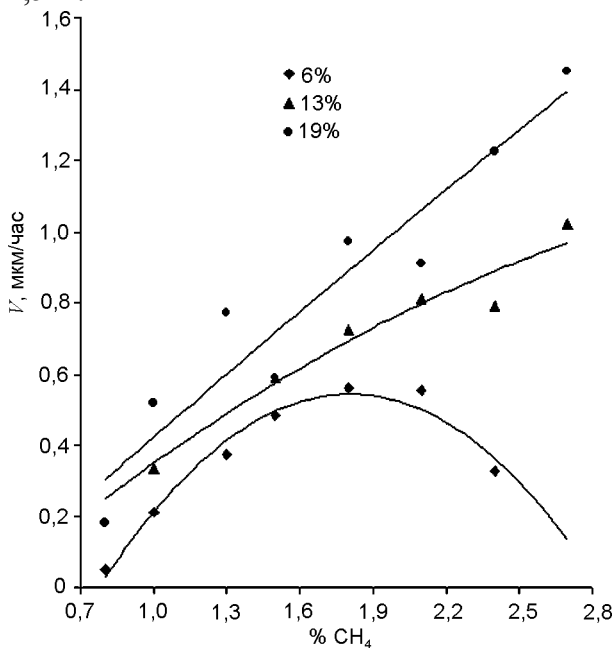


Рис. 1. Зависимость скорости роста алмазных покрытий от концентрации метана при концентрации азота в газовой фазе 6%, 13% и 19%. Концентрация аргона 60%, остальные 40% – азот, метан и водород в соответствующих отношениях.

Как видно из рис. 1, скорость роста алмазного покрытия при концентрации азота в газовой фазе 6% и 13% с увеличением концентрации метана сначала возрастает приблизительно по линейному закону, потом, при достижении определенной концентрации метана, рост замедляется. При концентрации азота 6% увеличение концентрации метана до 2,4% привело уже к падению скорости роста алмазного покрытия. При концентрации азота 19% в пределах исследованных изменений концентрации метана насыщения на кривой зависимости скорости роста алмазного покрытия от концентрации метана не было достигнуто. В целом, подобные зависимости скорости роста алмазного покрытия от концентрации метана наблюдаются и в случае получения алмазных покрытий из метан-водородных смесей, т.е., характер зависимости скорости роста от концентрации метана качественно не изменился при введении дополнительно в газовую фазу аргона и азота.

При фиксированной величине концентрации метана увеличение концентрации азота в исследованном диапазоне его значений приводило к повышению скорости роста алмазных покрытий. Чтобы выяснить, сохраняется ли такая зависимость скорости роста алмазного покрытия для более широкого диапазона изменения концентрации азота, были проведены несколько дополнительных экспериментов без изменения тока разряда при концентрации метана в газовой фазе 2,1% и аргона 60%.

На рис. 2 приведена зависимость скорости роста алмазного покрытия от концентрации азота при изменении ее в диапазоне от 0% до максимально возможного значения при заданных концентрациях аргона и метана.

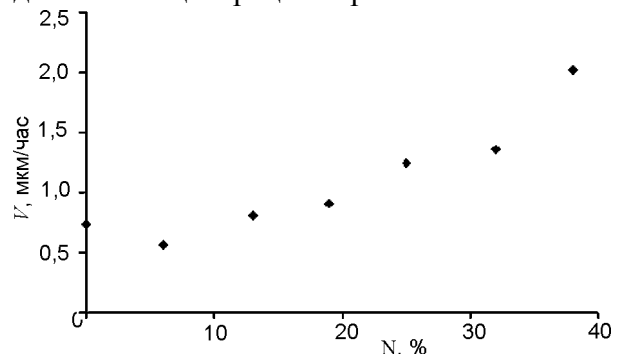


Рис. 2. Зависимость скорости роста алмазных покрытий от концентрации азота в газовой фазе (концентрация метана в газовой фазе 2,1%, аргона 60%, остальное – азот + водород).

Из приведенных на рис. 2 данных видно, что зависимость скорости роста наноструктурного алмазного покрытия от концентрации азота в газовой фазе имеет немонотонный характер. При концентрации азота в газовой фазе 6% скорость роста алмазного покрытия минимальна. Она становится сравнима со скоростью роста нелегированного азотом алмазного покрытия при возрастании концентрации азота до ~13%, и заметно больше – при значениях концентрации азота более 20%.

Такой характер зависимости скорости роста от концентрации азота отличается от данных, полученных в работе [7], в которой при увеличении концентрации азота, но за счет уменьшения концентрации аргона, наблюдалось линейное увеличение скорости роста алмазного покрытия во всем исследованном диапазоне изменения концентрации азота от 0% до 25%.

Рассмотрение совокупности полученных данных по влиянию азота на кинетику роста наноструктурных алмазных покрытий показывает, что степень этого влияния зависит сложным образом от соотношения в газовой фазе концентрации метана, водорода и азота.

Известно, что при введении в газовую фазу очень малых концентраций азота (на уровне единиц и десятков ppm), наблюдается повышение в разы скорости роста алмазных покрытий из метан-водородных смесей [16 – 19]. Столь сильное влияние при таких концентрациях азота на скорость роста алмазных покрытий, безусловно, связано с его влиянием на протекание химических процессов только на поверхности растущего осадка. Возможные механизмы такого влияния азота на рост алмазного покрытия рассмотрены в работах [17, 18].

Введение азота в газовую фазу при синтезе алмазных покрытий с концентрацией, сравнимой с концентрацией метана и более высокой, приводит к появлению новых газообразных соединений типа CN в заметных количествах и вызывает существенные изменения и перераспределение концентрации активных частиц и соединений по сравнению с составом газовой фазы до введения азота [20 – 23]. При этом, степень изменения и ха-

рактер перераспределения концентрации таких активных частиц и радикалов, как C, C<sub>2</sub>, CN, CH, CH<sub>3</sub> и других, играющих важную роль в процессе роста алмазного покрытия, зависит от соотношения концентраций всех компонент газовой фазы, а не только от абсолютного значения концентрации азота. В этом случае механизмы формирования алмазного покрытия могут быть разными для различных концентрационных соотношений компонент газовой фазы, чем, по-видимому, можно объяснить полученные зависимости скорости роста наноструктурных алмазных покрытий от концентрации азота в газовой фазе.

Изучение влияния тока разряда на скорость роста алмазного покрытия проводили в серии экспериментов при концентрации метана в газовой фазе 2,1%, азота 19% и концентрации аргона 60% и 75%, остальное – водород. На рис. 3 показаны зависимости скорости роста алмазных покрытий от тока разряда для этой серии экспериментов.

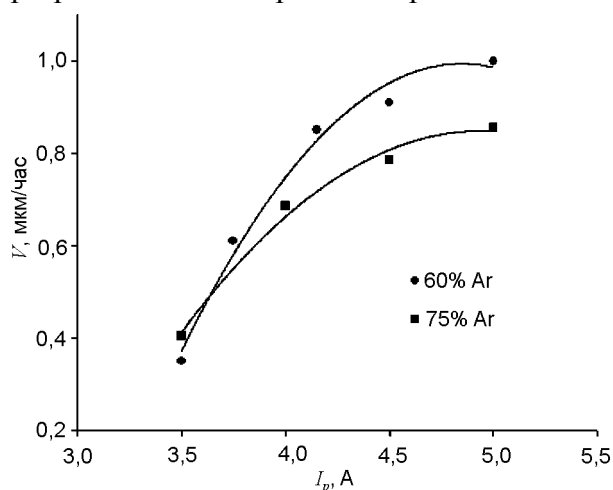


Рис. 3. Зависимость скорости роста алмазных покрытий от величины тока разряда при концентрации метана в газовой фазе 2,1%, азота 19% и концентрации аргона 60% и 75% (остальное – водород).

Полученные зависимости скорости роста алмазных покрытий от тока разряда в нашем случае дают общее представление о зависимости от температуры подложки в опосредованном виде. Данные зависимости качественно подобны зависимостям, полученным при синтезе алмазных покрытий из водород-метановых или водород-метан-аргоновых газовых смесей [24 – 27]. Т.е., с ростом тока разряда (соответственно, температуры синтеза алмазного покрытия) скорость их роста

возрастает и достигает своего максимума при определенной температуре. Что касается абсолютных значений скорости роста алмазных покрытий и влияния на ее величину концентрации аргона, то она отвечает диапазону значений, которые приводятся в литературе для скорости роста при синтезе как не легированных, так и легированных азотом наноструктурных алмазных покрытий [5, 8, 13].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования по влиянию азота на кинетику роста наноструктурных алмазных покрытий, синтезированных в плазме тлеющего разряда постоянного тока в скрещенных  $E/H$  полях из газовых смесей с относительно низким содержанием аргона.

Исследование влияния азота на кинетику роста наноструктурных алмазных покрытий при изменении его концентрации в газовой фазе за счет изменения концентрации водорода показало, что в зависимости от соотношения концентраций компонент газовой фазы скорость роста при введении азота может, как возрастать, так и уменьшаться. По литературным данным при введении азота за счет соответствующего уменьшения концентрации аргона наблюдалось линейное увеличение скорости роста наноструктурных алмазных покрытий. Различия по влиянию азота на скорость роста наноструктурных алмазных покрытий при их синтезе из газовой фазы с различными соотношениями компонент может быть следствием преобладания того или иного механизма формирования алмазного покрытия при изменении состава и концентрационных соотношений активных компонент газовой фазы, обусловленных введением в нее азота.

Получены зависимости скорости роста легированных азотом наноструктурных алмазных покрытий от тока тлеющего разряда в скрещенных  $E/H$  полях. Данные зависимости подобны имеющимся в литературе данным по влиянию мощности разряда или температуры подложки на скорость роста не легированных поликристаллических или наноструктурных алмазных покрытий.

В целом, результаты проведенных исследований дополняют имеющиеся данные по

влиянию азота на кинетику роста наноструктурных алмазных покрытий, синтезированных из газовой фазы разного состава с использованием различных методов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Williams O.A. Nanocrystalline diamond//Diamond and Related Materials. – 2011. – Vol. 20. – P. 621-640.
3. Gruen D.M. Nanocrystalline diamond films//Annu. Rev. Mater. Sci. – 1999. – Vol. 29. – P. 211-259.
4. Lin T., Yu G., Wee T, Shen Z. Compositional mapping of the argon-methane-hydrogen system for polycrystalline to nanocrystalline diamond film growth in a hot-filament chemical vapor deposition system//Appl. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 77, No. 17. – P. 2692-2694.
5. Fernandes A.J.S., Neto M.A., Almeida F.A., Silva R.F. et al. Nano- and micro-crystalline diamond growth by MPCVD in extremely poor hydrogen uniform plasmas//Diamond and Related Materials. – 2007. – Vol. 16. – P. 757-761.
6. 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//Diamond and Related Materials. – 2008. – Vol. 17. – P. 1080-1088.
7. Ральченко В.Г., Кононов В.И., Савельев А.В., Попович А.Ф. Власов И.И., Терехов С.В., Заведеев Е.В., Фомич А.В., Божко А.Д. Свойства легированных алмазных пленок, выращенных в СВЧ разряде//Сб. докл. XVII Междунар. симп. “Тонкие пленки в электронике”. – М.: МВТУ. – 2005. – С. 541-546.
8. Ralchenko V., Pimenov S., Konov V., Vlasov I., Khomich A., Saveliev A., Popovich A., Zavedeev E., Bozhko A., Loubnin E., Khmel'nitskii R. Nitrogenated nanocrystalline diamond films: Thermal and optical properties//Diamond and Related Materials. – 2007. – Vol. 16. – P. 2067-2073.
9. Bhattacharyya S., Auciello O., Birrell J., Carlisle J. Curtiss L.A., Goyette A.N., Gruen D.M., Krauss A. R., Schlueter J., Sumant A., Zapol P. Synthesis and characterization of highly-con-

- ducting nitrogen-doped ultrananocrystalline diamond films//*Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 79. – P. 1441-1443.
10. Teii K., Ikeda T. Conductive and resistive nanocrystalline diamond films studied by Raman spectroscopy//*Diamond and Related Materials.* – 2007. – Vol. 16. – P. 753-756.
  11. Pleskov Yu.V., Krotova M.D., Elkin V.V., Ralchenko V.G. The effects of nitrogenation on the electrochemical properties of nanocrystalline diamond films//*Diamond and Related Materials.* – 2007. – Vol. 16. – P. 2114-2117.
  12. Выровец И.И., Грицына В.И., Дудник С.Ф., Опалев О.А., Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Формирование наноструктурных алмазных пленок в плазме тлеющего разряда// *Материалы первой международной научной конференции по наноструктурным материалам.* – Минск. – 2008. – С. 360-361.
  13. Выровец И.И., Грицына В.И., Дудник С.Ф., Опалев О.А., Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Влияние состава газовой фазы на морфологию алмазных пленок, получаемых при возбуждении плазмы в скрещенных  $E/H$  полях// *Материалы 21 Международного симпозиума “Тонкие пленки в электронике”.* – М.: ОАО “ЦНИТИ ТЕХНОМАШ” – 2008. – С. 377-382.
  14. Ma K.L., Zhang W.J., Zou Y.S., Chong Y.M., Leung K.M., Bello I., Lee S.T. Electrical properties of nitrogen incorporated nanocrystalline diamond films//*Diamond and Related Materials.* – 2006. – Vol. 15. – P. 626-630.
  15. Грицына В.И., Дудник С.Ф., Опалев О.А., Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Особенности морфологии алмазных покрытий с нанокристаллической структурой// *ВАНТ, Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.* – 2011. – № 4. – С. 165-168.
  16. Tallaire A., Achard J., Silva F., Sussmann R.S., Gicquel A. Homoepitaxial deposition of high-quality thick diamond films: effect of growth parameters//*Diamond and Related Materials.* – 2005. – Vol. 14. – P. 249-254.
  17. Regemorter T.Van, Larsson K. Effect of substitutional N on the diamond CVD growth process: A theoretical approach//*Diamond and Related Materials.* – 2008. – Vol. 17. – P. 1076-1079.
  18. Shah Zoya Mehmood, Mainwood Alison. A theoretical study of the effect of nitrogen, boron and phosphorus impurities on the growth and morphology of diamond surfaces//*Diamond and Related Materials.* – 2008. – Vol. 17. – P. 1307-1310.
  19. Liang Qi, Yan Chih-shiue, Meng Yufei, Lai Joseph, Krasnicki Szczesny, Mao Ho-kwang, Hemley Russell J. Recent advances in high-growth rate single-crystal CVD diamond//*Diamond and Related Materials.* – 2009. – Vol. 18. – P. 698-703.
  20. Chatei Hassan, Bougdira Jamal, Remy Mishel, Alnot Patrick, Bruch Christian, Kruger Jan K.. Effect of nitrogen concentration on plasma reactivity and diamond growth in  $H_2-CH_4-N_2$  microwave discharge//*Diamond and Related Materials.* – 1997 – Vol. 6. – P. 107-119.
  21. Qi Xue-Gui, Chen Ze-Shao, Xu Hong. Construction and analysis of C-H-N phase diagram for diamond chemical vapor deposition by simulation of gas-phase chemistry//*Surface and Coatings Technology.* – 2006. – Vol. 200, No. 18-19. – P. 5268-5276.
  22. Bhattacharyya S., Auciello O., Birrell J., Carlisle J.A., Curtiss L.A., Goyette A.N., Gruen D.M., Krauss A.R., Schlueter J., Sumant A., and Zapol P. Synthesis and characterization of highly-conducting nitrogen-doped ultrananocrystalline diamond films//*Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 79, No. 10. – P. 1441-1443.
  23. Chuan-Sheng Wang, Ging-Horng Tong, Huang-Chin Chen, Wen-Ching Shih, I-Nan Lin. Effect of  $N_2$  addition in Ar plasma on the development of microstructure of ultra-nanocrystalline diamond films//*Diamond and Related Materials.* – 2010. – Vol.19 – P. 147-152.
  24. Карпухина Т.А., Чередниченко А.Г., Буйлов Л.Л., Алексенко А.Е., Белянин А.Ф. Исследование дефектных центров и примесей в поликристаллических пленках алмаза// *Труды 1<sup>го</sup> международного семинара по алмазным пленкам. Техника средств связи. Серия “Технология производства и оборудования”.* – 1991. – Вып. 4. – С. 40-50.
  25. Выровец И.И., Грицына В.И., Дудник С.Ф., Кутный В.Е., Опалев О.А., Рыбка А.С., Стрельницкий В.Е. Исследование влияния параметров синтеза алмазных покрытий на скорость их роста и величину удельного электрического сопротивления// *Вопросы атомной науки и техники, Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.* – 2010. – Т. 95, № 1. – С. 104-107.
  26. Barbosa D.C., Almeida F.A., Silva R.F., Ferreira N.G., Trava-Airoldi V.J., Corat E.J. Influence of substrate temperature on formation of ultrananocrystalline diamond films deposited by HFCVD argon-rich gas mixture//*Diamond & Related Materials.* – 2009. – Vol. 18. – P. 1283-1288.

27. Barbosa D.C., Barreto P.R.P., Trava-Airoldi V.J., Corat E.J. Growth and characterization of diamond micro and nano crystals obtained using different methane concentration in argon-rich gas mixture// *Diamond and Related Materials*. – 2010. – Vol. 19. – P. 768-771.

## LITERATURA

1. Vyrovec I.I., Gricyna V.I., Dudnik S.F., Opalev O.A., Reshetnyak E.N., Strelnickij V.E. Nanokristallicheskie almaznye CVD-plenki: struktura, svojstva i perspektivy primeneniya// *Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti*. – 2010. – T. 8, № 1. – S. 1-19.
2. Williams O.A. Nanocrystalline diamond// *Diamond and Related Materials*. – 2011. – Vol. 20. – P. 621-640.
3. Gruen D.M. Nanocrystalline diamond films// *Annu. Rev. Mater. Sci.* – 1999. – Vol. 29. – P. 211-259.
4. Lin T., Yu G., Wee T, Shen Z. Compositional mapping of the argon-methane-hydrogen system for polycrystalline to nanocrystalline diamond film growth in a hot-filament chemical vapor deposition system// *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – Vol. 77, No. 17. – P. 2692-2694.
5. Fernandes A.J.S., Neto M.A., Almeida F.A., Silva R.F. et al. Nano- and micro-crystalline diamond growth by MPCVD in extremely poor hydrogen uniform plasmas// *Diamond and Related Materials*. – 2007. – Vol. 16. – P. 757-761.
6. Williams O.A., Nesladek M., Daenen M., Michelson S., Hoffman A., Osawa E., Haenen K., Jackman R.B. Growth, electronic properties and applications of nanodiamond// *Diamond and Related Materials*. – 2008. – Vol. 17. – P. 1080-1088.
7. Ralchenko V.G., Kononov V.I., Savelev A.V., Popovich A.F., Vlasov I.I., Terehov S.V., Zavedev E.V., Fomich A.V., Bozhko A.D. Svojstva legirovannyh almaznyh plenok, vyraschennyh v SVCh razryade// *Sb. dokl. XVII Mezhdunar. simpoz. "Tonkie plenki v `elektronike"*. – M.: MVTU. – 2005. – С. 541-546.
8. Ralchenko V., Pimenov S., Konov V., Vlasov I., Khomich A., Saveliev A., Popovich A., Zavedev E., Bozhko A., Loubnin E., Khmel'nitskii R. Nitrogenated nanocrystalline diamond films: Thermal and optical properties// *Diamond and Related Materials*. – 2007. – Vol. 16. – P. 2067-2073.
9. Bhattacharyya S., Auciello O., Birrell J., Carlisle J. Curtiss L.A., Goyette A.N., Gruen D.M., Krauss A.R., Schlueter J., Sumant A., Zapol P. Synthesis and characterization of highly-conducting nitrogen-doped ultrananocrystalline diamond films// *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 79. – P. 1441-1443.
10. Teii K., Ikeda T. Conductive and resistive nanocrystalline diamond films studied by Raman spectroscopy// *Diamond and Related Materials*. – 2007. – Vol. 16. – P. 753-756.
11. Pleskov Yu.V., Krotova M.D., Elkin V.V., Ralchenko V.G. The effects of nitrogenation on the electrochemical properties of nanocrystalline diamond films// *Diamond and Related Materials*. – 2007. – Vol. 16. – P. 2114-2117.
12. Vyrovec I.I., Gricyna V.I., Dudnik S.F., Opalev O.A., Reshetnyak E.N., Strelnickij V.E. Formirovanie nanostrukturnykh almaznyh plenok v plazme tleyushego razryada// *Materialy pervoj mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii po nanostrukturnym materialam*. – Minsk. – 2008. – S. 360-361.
13. Vyrovec I.I., Gricyna V.I., Dudnik S.F., Opalev O.A., Reshetnyak E.N., Strelnickij V.E. Vliyanie sostava gazovoj fazy na morfologiyu almaznyh plenok, poluchaemyh pri vobuzhdenii plazmy v skreschennyh E/H polyah// *Materialy 21 Mezhdunar. simpoziuma "Tonkie plenki v elektronike"*. – Moskva, OAO 2CNITI TEHNOMASH" – 2008. - S. 377-382.
14. Ma K.L., Zhang W.J., Zou Y.S., Chong Y.M., Leung K.M., Bello I., Lee S.T. Electrical properties of nitrogen incorporated nanocrystalline diamond films// *Diamond and Related Materials*. – 2006. – Vol. 15. – P. 626-630.
15. Gricyna V.I., Dudnik S.F., Opalev O.A., Reshetnyak E.N., Strelnickij V.E. Osobennosti morfologii almaznyh pokrytij s nanokristallicheskoj strukturoj// *VANT, Seriya: Fizika radiacionnyh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie*. – 2011. – № 4. – S. 165-168.
16. Tallaire A., Achard J., Silva F., Sussmann R.S., Gicquel A. Homoepitaxial deposition of high-quality thick diamond films: effect of growth parameters// *Diamond and Related Materials*. – 2005. – Vol. 14. – P. 249-254.
17. Regemorter T. Van, Larsson K. Effect of substitutional N on the diamond CVD growth process: A theoretical approach// *Diamond and Related Materials*. – 2008. – Vol. 17. – P. 1076-1079.
18. Shah Zoya Mehmood, Mainwood Alison. A theoretical study of the effect of nitrogen, boron and phosphorus impurities on the growth and morphology of diamond surfaces// *Diamond and Related Materials*. – 2008. – Vol. 17. – P. 1307-1310.
19. Liang Qi, Yan Chih-shiue, Meng Yufei, Lai Joseph, Krasnicki Szczesny, Mao Ho-kwang, Hemley Russell J. Recent advances in high-growth rate

- single-crystal CVD diamond//Diamond and Related Materials. – 2009. – Vol. 18. – P. 698-703.
20. Chatei Hassan, Bougdira Jamal, Remy Mishel, Alnot Patrick, Bruch Christian, Kruger Jan K.. Effect of nitrogen concentration on plasma reactivity and diamond growth in H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> microwave discharge//Diamond and Related Materials. – 1997. – Vol. 6. – P. 107-119.
  21. Qi Xue-Gui, Chen Ze-Shao, Xu Hong. Construction and analysis of C-H-N phase diagram for diamond chemical vapor deposition by simulation of gas-phase chemistry//Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 200, No. 18-19. – P. 5268-5276.
  22. Bhattacharyya S., Auciello O., Birrell J., Carlisle J.A., Curtiss L.A., Goyette A.N., Gruen D.M., Krauss A.R., Schlueter J., Sumant A., Zapol P. Synthesis and characterization of highly-conducting nitrogen-doped ultrananocrystalline diamond films//Appl. Phys. Lett.– 2001.– Vol. 79, No. 10. – P. 1441-1443.
  23. Chuan-Sheng Wang, Ging-Horng Tong, Huang-Chin Chen, Wen-Ching Shih, I-Nan Lin. Effect of N<sub>2</sub> addition in Ar plasma on the development of microstructure of ultra-nanocrystalline diamond films//Diamond and Related Materials. – 2010. – Vol. 19. – P. 147-152.
  24. Karpuhina T.A., Cherednichenko A.G., Bujlov L.L., Aleksenko A.E., Belyanin A.F. Issledovanie defektnykh centrov i primesej v polikristallicheskih plenkah almaza//Trudy 1<sup>go</sup> mezhdnarodnogo seminaro po almaznym plenkam. Tehnika sredstv svyazi. Seriya “Tehnologiya proizvodstva i oborudovanie”.– 1991.– Vyp. 4.–S. 40-50.
  25. Vyrovce I.I., Gricyna V.I., Dudnik S.F., Kutnij V.E., Opalev O.A., Rybka A.S., Strelnickij V.E. Issledovanie vliyaniya parametrov sinteza almaznykh pokrytij na skorost ih rosta i velichinu udelnogo elektricheskogo soprotivleniya//Voprosy atomnoj nauki i tehniki, Seriya: Fizika radiacionnykh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie. – 2010. – T. 95, № 1. – S. 104-107.
  26. Barbosa D.C., Almeida F.A., Silva R.F., Ferreira N.G., Trava-Airoldi V.J., Corat E.J. Influence of substrate temperature on formation of ultrananocrystalline diamond films deposited by HFCVD argon-rich gas mixture//Diamond & Related Materials. – 2009. – Vol. 18. – P. 1283-1288.
  27. Barbosa D.C., Barreto P.R.P., Trava-Airoldi V.J., Corat E.J. Growth and characterization of diamond micro and nano crystals obtained using different methane concentration in argon-rich gas mixture//Diamond and Related Materials. – 2010. – Vol. 19. – P. 768-771.