ГЕНЕРАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ*

К. П. Савкин¹, Д. А. Сорокин², Д. В. Белоplotov³, В. О. Сёмин⁴, А. Г. Николаев⁵, М. В. Шандриков⁶, А. А. Черкасов⁷

Аннотация: Исследованы особенности импульсно-периодического тлеющего разряда в потоке аргона при атмосферном давлении применительно к генерации аэрозолей, в которых значительную долю составляют наночастицы оксида цинка. Выявлен не изученный ранее режим функционирования тлеющего разряда при атмосферном давлении, при котором испускаются атомы металла с поверхности расплавленной цинковой катодной вставки в результате совокупности влияния тепловой нагрузки со стороны катодного слоя разряда и газодинамического воздействия струи рабочего газа. Основные электрофизические и оптические параметры разряда, сопровождающие это явление, были следующие: напряжение горения разряда 150–300 В при токе 500–600 мА и длительности импульсов 9–12 мкс, следующих с частотой 60–100 кГц. Расход аргона составлял 1 л/мин. Присутствие частиц цинка в разрядной плазме было идентифицировано по соответствующим линиям, характерным для ионов и атомов этого материала, которые присутствовали в эмиссионном спектре и уверенно разрешались на фоне линий атомов аргона (Ar I). На основе разряда с такими параметрами реализована генерация порошков с размерами частиц от 10 до 50 нм в результате испускания плазменных потоков с высоким содержанием металлических частиц из разрядной системы через отверстие в аноде в воздушную среду при атмосферном давлении, где происходило их остывание, коагуляция в наноразмерные агломераты и окисление при взаимодействии с содержащимся в воздухе кислородом до химического состояния, соответствующего стабильному оксиду цинка. Рассмотрены перспективы дальнейшего развития данного метода синтеза нанопорошков и решения проблемы повышения его производительности.

Ключевые слова: тлеющий разряд; атмосферное давление; газоразрядная плазма; атомы металлов; ионы металлов; излучение; наночастицы

DOI: 10.30826/CE24170406

EDN: WLSQUL

Литература

1. Moezzi A., McDonagh A. M., Cortie M. B. Study of the optical and gas sensing properties of In₂O₃ nanoparticles synthesized by rapid sonochemical method // *J. Mater. Sci. — Mater. El.*, 2020. Vol. 31. P. 17474. doi: 10.1007/s10854-020-04303-9
2. Gudmundsson J. T. Physics and technology of magnetron sputtering discharges // *Plasma Sources Sci. T.*, 2020. Vol. 29. P. 113001. doi: 10.1088/1361-6595/abb7bd.
3. Anders A. Physics of arcing, and implications to sputter deposition // *Thin Solid Films*, 2006. Vol. 502. P. 22–28. doi: 10.1016/j.tsf.2005.07.228.
4. Любимов Г. А., Раховский В. И. Катодное пятно вакуумной дуги // *Успехи физических наук*, 1978. Т. 125. С. 665–706.
5. Vladoiu R., Tichý M., Mandes A., Dinca V., Kudrna P. Thermionic vacuum arc — a versatile technology for thin film deposition and its applications // *Coatings*, 2020. Vol. 10. No. 3. P. 211. doi: 10.3390/coatings10030211.
6. Tarasenko V., Vinogradov N., Beloplotov D., Burachenko A., Lomaev M., Sorokin D. Influence of nanoparticles and metal vapors on the color of laboratory and atmospheric discharges // *Nanomaterials*, 2022. Vol. 12. P. 652. doi: 10.3390/nano12040652.
7. Sorokin D., Savkin K., Beloplotov D., Semin V., Kazakov A., Nikonenko A., Cherkasov A., Shcheglov K. Magnesium oxide powder synthesis in cathodic arc discharge plasma in an argon environment at atmospheric pressure // *Ceramics*, 2023. Vol. 6. No. 3. P. 1531–1545. doi: 10.3390/ceramics6030095.

*Статья основана на докладе, представленном на 11-м Международном симпозиуме по неравновесным процессам, плазме, горению и атмосферным явлениям (НЕРСАР), прошедшем в Сочи (Россия) в период с 7 по 11 октября 2024 г. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00265, <https://rscf.ru/project/22-19-00265/>.

¹Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, savkin@opee.hcei.tsc.ru

²Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru

³Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, rffbdim@loi.hcei.tsc.ru

⁴Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, viktor.semin.tsk@gmail.com

⁵Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, nik@opee.hcei.tsc.ru

⁶Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, shandrikov@opee.hcei.tsc.ru

⁷Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, cherkasov@opee.hcei.tsc.ru

8. *Tsvetoukh M. M.* Plasma parameters of the cathode spot explosive electron emission cell obtained from the model of liquid-metal jet tearing and electrical explosion // *Phys. Plasmas*, 2018. Vol. 25. No. 5. P. 053504. doi: 10.1063/1.4999377.
9. *Anders S., Anders A., Yu K. M., Yao X. Y., Brown I. G.* On the macroparticle flux from vacuum arc cathode spots // *IEEE T. Plasma Sci.*, 1993. Vol. 21. No. 5. P. 440–446. doi: 10.1109/27.249623.
10. *Liu S.-H., Trelles J., Li Ch.-J., Li Ch.-X., Guo H.-B.* A review and progress of multiphase flows in atmospheric and low pressure plasma spray advanced coating // *Materials Today Physics*, 2022. Vol. 27. P. 100832. doi: 10.1016/j.mtphys.2022.100832.
11. *Huan Yu., Wu K., Li Ch., Liao H., Debliqy M., Zhang Ch.* Micro-nano structured functional coatings deposited by liquid plasma spraying // *J. Adv. Ceram.*, 2020. Vol. 9. No. 5. P. 517–534. doi: 10.1007/s40145-020-0402-9.
12. *Gulyaev I. P., Dolmatov A. V., Kharlamov M. Yu., Gulyaev P. Yu., Jordan V. I., Krivitsun I. V., Korzhyk V. M., Demyanov O. I.* Arc-plasma wire spraying: An optical study of process phenomenology // *J. Therm. Spray Techn.*, 2015. Vol. 24. No. 7. P. 1566–1573. doi: 10.1007/s11666-015-0356-6.
13. *Zhang L., Liao X.-J., Zhang S.-L., Luo X.-T., Li Ch.-J.* Effect of powder particle size and spray parameters on the Ni/Al reaction during plasma spraying of Ni–Al composite powders // *J. Therm. Spray Techn.*, 2021. Vol. 30. P. 181–195. doi: 10.1007/s11666-020-01150-2.
14. *Savkin K., Oks E., Yushkov G., Ivanov Yu.* A low-current atmospheric pressure discharge generating atomic magnesium fluxes // *J. Appl. Phys.*, 2020. Vol. 127. P. 213303. doi: 10.1063/5.0006239.
15. *Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J.* NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.11). Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2023. doi: 10.18434/T4W30F.
16. *Merkt F., Osterwalder A., Seiler R., Signorell R., Palm H., Schmutz H., Gunzinger R.* High Rydberg states of argon: Stark effect and field-ionization properties // *J. Phys. B — At. Mol. Opt.*, 1998, Vol. 31. P. 1705. doi: 10.1088/0953-4075/31/8/020.
17. *Ranjit G., Sukenik C. I.* Experimental investigation of long-lived Rydberg states in ultracold argon // *Phys. Rev. A*, 2013. Vol. 87. No. 3. P. 033418. doi: 10.1103/physrev.87.033418.
18. *Vlcek J.* A collisional-radiative model applicable to argon discharges over a wide range of conditions. I. Formulation and basic data // *J. Phys. D Appl. Phys.*, 1989, Vol. 22. No. 5. P. 623–631. doi: 10.1088/0022-3727/22/5/009.
19. *Okada T., Sugawara M.* Determination of ionization cross section for argon metastable-metastable collision by means of afterglow technique // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996. Vol. 35. No. 8. P. 4535–4540. doi: 10.1143/jjap.35.4535.
20. *Biondi M. A.* Ionization by the collision of pairs of metastable atoms // *Phys. Rev.*, 1951. Vol. 82. No. 3. P. 453–454. doi: 10.1103/physrev.82.453.2.
21. *Banks P. R., Blades M. W.* Atomic excitation in a jet-assisted glow discharge plasma plume // *Spectrochim. Acta B*, 1992. Vol. 47. No. 11. P. 1287–1307. doi: 10.1016/0584-8547(92)80120-6.
22. *Honig R. E., Kramer D. A.* Vapor pressure data for the solid and liquid elements // *RCA Rev.*, 1969. Vol. 30. No. 2. P. 285.

Поступила в редакцию 04.09.2024