

Токовые слои и фракталоподобные агрегаты в прикатодной плазме дугового разряда

Н. А. Смоланов

Проведен анализ процессов в плазме вакуумной дуги, которые, возможно, приводят к образованию и росту фрактальных агрегатов. В основе анализа лежат результаты, полученные при исследовании катодного пятна и структуры пылевых частиц плазмы дугового разряда. Одна из возможных причин формирования фрактальных структур – возникновение токовых слоев и капельных пятен при сближении катодных пятен. Поток ионов между сближающимися катодными пятнами дугового разряда при их движении по плоскости распыляемого катода можно рассматривать как токовые слои. Магнитное поле, создаваемое токовым слоем, является источником энергии. Диссипация этой энергии означает создание неустойчивости фронта роста, в которых может происходить образование фракталоподобных агрегатов. Этот процесс можно отнести к явлению дрейфово-диссипативной неустойчивости – одному из видов плазменной микронеустойчивости.

Ключевые слова: дуговой разряд, плазма, катодное пятно, капельное пятно, токовые слои, фрактальные агрегаты, неустойчивость плазмы.

Ссылка: Смоланов Н. А. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 29.

Reference: N. A. Smolantov, Prikl. Fiz., No. 4, 29 (2019).

Введение

Процессы в дуговом разряде, как известно, определяются эмиссионным центром катодного пятна, возникающего и перемещающегося по поверхности катода. Катодное пятно – 1-я стадия генерации плазмы – до сих пор во многом не изучена до полного понимания и вызывает практический интерес в связи с задачами увеличения выхода ионов и наночастиц из продуктов дугового разряда, а также уменьшения доли капельной фракции [1, 2].

В последнее время делаются попытки получить дуговым методом полупроводниковые и керамические пленки на мишени, в

частности, покрытия из бора и его соединений. Однако даже в импульсном режиме (300 мкс, амплитуда тока 100 А) авторам не удалось получить разряд с диффузной привязкой пятна на катоде [3]. Обнаружено, что горение дугового разряда с катодом из бора сопровождается значительным потоком раскаленных микрочастиц (микрокапель). Ожидание авторов [3], что состав генерируемой плазмы будет состоять только из ионов материала катода без подачи рабочего газа в течение длительного устойчивого разряда, на наш взгляд, сомнительно. В исходном дуговом электрическом разряде капли присутствуют всегда.

Заслуживают внимания работы по оптимизации струйных плазменных течений во внешнем магнитном поле [4, 5]. Авторы установили, что повысить скорость плазменного сгустка можно, стабилизируя разряд магнитным полем токов, протекающих по аноду. Именно такой принцип стабилизации катодного пятна используется в распылительных вакуумных системах [6].

Смоланов Николай Александрович, доцент.
Мордовский государственный университет
имени Н. П. Огарева.
Россия, 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, 68.
Тел. 8(8342) 29-05-13. E-mail: smolanovna@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2019 г.

© Смоланов Н. А., 2019

Насчитывается свыше 20 различных и даже взаимоисключающих объяснений явлений в катодных пятнах [7]. Поэтому поиск условий катодного дугового распыления, в которых может происходить образование фракталоподобных агрегатов, увеличения выхода ионов и уменьшения капельной фракции заставляет рассмотреть более детально процессы в катодном пятне дугового разряда и существующие его модели.

Целью данной работы являлось дальнейшее изучение структуры и свойств частиц из плазмы дугового разряда и поиск условий (причин), при которых зарождаются фрактальные структуры.

Постановка работы и результаты

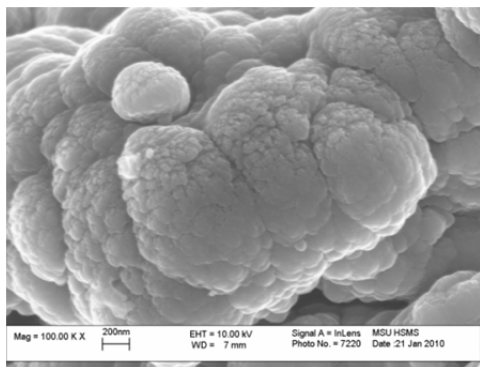
Дуга, как один из видов электрического разряда, является предметом изучения разряда в целом и катодного пятна в отдельности. Электрическую дугу обычно рассматривают в следующих условиях: 1 – как источник плазмы; 2 – при изучении законов магнитной электродинамики; 3 – как источник заряженных и нейтральных микрочастиц в твердом и жидком состояниях; 4 – как процесс расширения вещества в вакуум.

Нами методом катодного дугового распыления было получено вещество в виде сажи с мелкодисперсной структурой, осажденной из плазмы дугового разряда вблизи катода и на стенках вакуумной камеры [8]. Эти частицы (пылевые структуры) по некоторым признакам обладают свойствами, присущими нанокристаллическим структурам. Было установлено, что структура и свойства порошков зависят от режимов распыления катода. Аналогичные по морфологии структуры были также обнаружены на стенках токамака [9–11]. Подобная пыль, названная академиком Кадомцевым как «металлический снег» с размером частиц от 10 до 1000 мкм, формировалась при эксплуатации токамака Глобус-М. Причина ее образования – накопление водорода, поступающего из плазмы, в поверхностном слое нержавеющей стали. Частицы нержавеющей стали становились магнитными при плавлении ее униполярными микродугами, что приводит к разрушению одной из стенок, обращенной к токамаку.

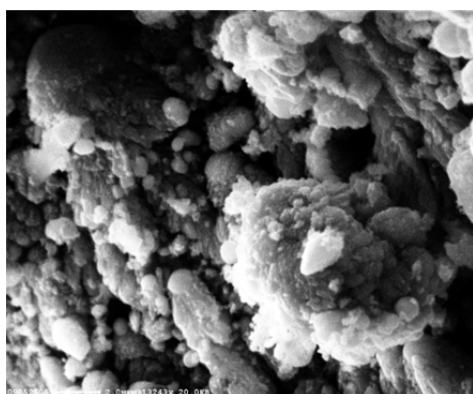
Магнитные свойства частиц, полученных в нашем случае, также проявляют свойства ферромагнетиков. К тому же их намагниченность заметно зависит от размеров частиц [12], что может свидетельствовать об их сложном внутреннем строении в наномасштабных размерах. В настоящее время интерес к подобным структурам типа «пух» вырос как к одному из материалов с максимально развитой поверхностью [10]. Исследования последних лет показали, что пылевые структуры в плазменных технологиях могут обладать интересными и полезными свойствами благодаря малым размерам и высокой химической активности. Для создания пылевой компоненты и регистрация собственного вращения пылевых частиц применяются частицы боросиликатного стекла размером от 10 до 120 мкм [13]. При исследовании пылевых структур (кулоновских пылевых сфер) часто применяют сферические пластиковые частицы диаметром несколько мкм, введенными в разряд при различных параметрах, в том числе и при криогенной температуре [14, 15]. В нашем случае пылевые частицы возникают непосредственно из катодного и капельного пятен [16, 17], что позволяет оценить процессы их взаимодействия между собой и окружающим потоком плазмы дугового разряда.

Ионно-плазменные технологии являются одними из методов получения металлических наноструктур различных типов, в том числе в виде «цветной капусты», «моха» и других. На рис. 1 даны результаты электронной микроскопии подобных частиц, полученных нами из плазмы дугового разряда. Порошки получали на стенках вакуумной камеры установки ННВ-6.6И4 методом и при режимах, описанных в работе [8]. При изучении структуры и свойств полученных частиц из дугового разряда применен ряд современных методов. Комплексный подход в изучении образующихся из низкотемпературной плазмы вакуумного дугового разряда структур и их свойств проведен в работе [18]. Примененный нами метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) к исследованию дисперсной системы микрочастиц показал, что основной вклад в рассеяние вносят частицы, которые можно отнести к массовым фракталам с размерностью 2,62 [19, 20]. Нами сделан вывод, что частицы (кластеры), линейные размеры которых 5–55 нм, имеют с развитую поровую

структуру с достаточно сильно изрезанной поверхностью.



a



б

**Рис. 1. Электронная микроскопия изоб-
ражения частиц: а – структура «цветной
капусты» – потенциал подложки 0 В;
б – структура «мох» – потенциал под-
ложки 200 В.**

Образование фракталоподобных агрегатов обычно происходит в условиях неустойчивости фронта роста, а рост фракталов сопровождается высокими скоростями диссипации энергии [21]. Возник вопрос: где могут существовать такие условия в дуговом разряде (при катодном распылении)? Исследование процессов в плазме зондами Ленгмюра не в состоянии разрешить пространственное распределение потенциалов магнитного и электрического полей в пределах наноразмеров формирующихся в плазме частиц. Условия протекания процессов, в том числе и плазмохимических, во многом зависят от координаты (расположения) образца в камере. Следует также учитывать плотность тока в пределах площади, где возможны различные направления токов в катодном пятне. Было высказано предположение (гипотеза), что своей необычной структурой (фрактальной) часть

осажденных частиц из плазмы дугового разряда обязана токовым слоям, возникающим вблизи катодного пятна [22].

Модели катодных пятен и токовых слоев

Рассмотрим процессы в катодном пятне, токовые слои около пятен и фрактальные структуры во взаимосвязи. Следует отметить, что в работах о пылевой плазме обычно не исследуют элементный состав пылинок, их структуру и морфологию, рассматривая область космической (не лабораторной) плазмы и пыли [13–15]. В нашем случае – дуговом разряде – кристаллизация капельной составляющей плазменного потока около катода приводит к образованию наноструктур в твердой матрице, т. е. это не просто кристаллизация, а конденсация вещества в возбужденном состоянии. При этом, как было установлено в ряде работ, из плазменного потока могут возникать образования неизвестных соединений с фрактальной структурой. Из анализа известных моделей катодных пятен отметим еще раз их основные особенности, обратив особое внимание на поведение капельной составляющей дугового разряда.

1) Катодное пятно – источник ионов, электронов, капель и твердых частиц, которыми можно управлять внешними электрическими и магнитными полями и трудно исследовать из-за быстроты процессов и малости размеров [1, 2].

2) Около катодного пятна возможно существование плазменных образований (капельные пятна), параметры которых близки к параметрам плазмы катодного пятна [2, 16, 17].

3) При образовании плазмы вокруг капели возможны два режима их поведения: «холодный» – без заметной термоэмиссии электронов, и «горячий» – с испарением электронов [23].

4) Капли при движении могут вращаться, коллективно перемешиваться и коагулировать при затвердевании [13, 24]. По этим признакам капли подобны пылевым частицам плазмы.

Особо отметим, что в микрочастице (капле), движущейся в неоднородном магнит-

ном поле, индуцируется электрический ток, который взаимодействует с внешним магнитным полем [11, 25, 26].

Обсуждение теоретических и экспериментальных результатов

В известных моделях обычно рассматриваются процессы в уединенном катодном пятне без учета взаимодействия с другими и его перемещения – см. например рис. 2 и рис. 3 [27, 28].

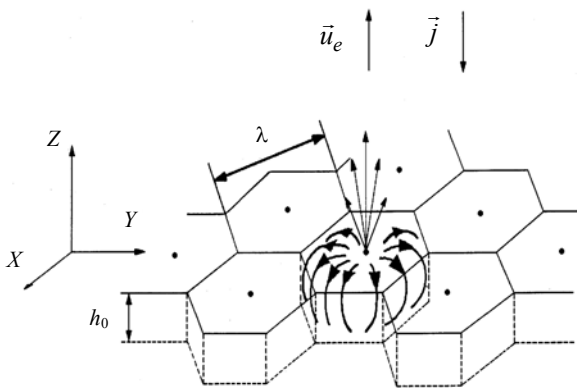


Рис. 2. Формирование и структура токовых ячеек катодного пятна вакуумной дуги [27].

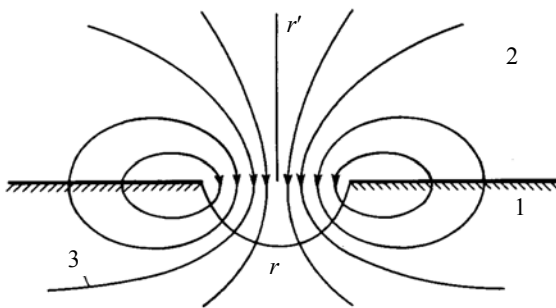


Рис. 3. Геометрия эмиссионного центра: 1 – катод; 2 – плазма; 3 – линии тока [28].

Нами высказано предположение, что поток ионов между перемещающимися катодными пятнами дугового разряда можно рассматривать как токовый слой, образующийся при их сближении. Скачок магнитного поля в проводящей плазме, разделяющие магнитные поля различной направленности, ведёт к возникновению тонкого слоя электрического тока. В результате происходящего в слое пересоединения магнитных силовых линий меняется топология магнитного поля [6, 29]. Это сопровождается переходом энергии поля в тепло,

излучение, энергию магнитогидродинамических течений и ускоренных частиц [29, 30]. Таким образом, магнитное поле, создаваемое токовыми слоями, может являться источником энергии, диссипация которой означает создание неустойчивости фронта роста, в которых может происходить образование фракталоподобных агрегатов. Такая ситуация может возникнуть вблизи катодного пятна в коаксиальном магнитном поле при одновременном создании электрического поля в межэлектродном пространстве (подача отрицательного потенциала на подложку). Вероятно, этот процесс можно отнести к явлению дрейфово-диссипативной неустойчивости – одному из видов плазменной микронеустойчивости. Она обусловлена неоднородностью и многокомпонентностью неравновесной плазмы. Это вызывает появление мелкомасштабных пульсаций плазмы и организацию самоподобных (рекурсивных) структур с фрактальными свойствами во времени и пространстве, которые и идентифицируют данный тип неустойчивости [10, 25].

В работе [30] проведена оценка энергии потоков плазмы, ускоряемых силами Ампера, при изменении суммарного тока в нейтральном токовом слое. Показано, что имеется тенденция быстрого роста энергии потоков с увеличением тока. Возрастание энергии потоков плазмы с увеличением тока в слое обусловлено как увеличением сил Ампера, так и увеличением ширины токового слоя, в котором происходит ускорение плазмы [30]. Это соответствует условиям создания неустойчивости фронта роста фракталоподобных агрегатов.

Заключение

Проведено подробное рассмотрение процессов в плазме вакуумной дуги, которые, возможно, приводят к образованию и росту фрактальных агрегатов. В основе анализа лежат результаты, полученные при исследовании катодного пятна и структуры пылевых частиц плазмы дугового разряда. Одна из возможных причин формирования фрактальных структур – возникновение токовых слоев и капельных пятен при сближении катодных пятен. Поток ионов между сближающимися катодными пятнами дугового разряда при их

движении по плоскости распыляемого катода можно рассматривать как токовые слои. Магнитное поле, создаваемое токовым слоем, является источником энергии. Диссипация этой энергии означает создание неустойчивости фронта роста, в которых может происходить образование фракталоподобных агрегатов. Этот процесс можно отнести к явлению дрейфово-диссипативной неустойчивости – одному из видов плазменной микронеустойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Любимов Г. А., Раховский В. И. // УФН. 1978. Т. 125. № 4. С. 665.
2. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. – Berkeley: Springer Science, 2008.
3. Гушенец В. И., Бугаев А. С., Окс Е. М. // Прикладная физика. 2017. № 2. С. 19.
4. Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В. // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 26.
5. Глинов А. П., Головин А. П., Шалеев К. В. // Прикладная физика. 2018. № 2. С. 21.
6. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
7. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992.
8. Смоланов Н. А., Панькин Н. А., Батин В. В., Павкин Е. П. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 30.
9. Крауз В. И., Мартыненко Ю. В., Свечников Н. Ю., Смирнов В. П., Станкевич В. Г., Химченко Л. Н. // УФН. 2010. Т. 180. № 10. С. 1055.
10. Будаев В. П. // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. Вып. 5. С. 284.
11. Недоспасов А. В., Сергиенко Г. В. / Тез. докл. XXXVII Междунар. (Звенигородской) конф. по физ. плазмы и УТС. – М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН». 2010. С. 28.
12. Smolanov N. A. // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 857. No. 1. С. 012043.
13. Карасев В. Ю., Дзлешева Е. С., Павлов С. И., Новиков Л. А., Машек И. Ч. // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 1. С. 50.
14. Поляков Д. Н., Шумова В. В., Василяк Л. М. // Прикладная физика. 2018. № 4. С. 11.
15. Шумова В. В., Поляков Д. Н., Василяк Л. М. // Прикладная физика. 2018. № 2. С. 36.
16. Батраков А. В., Ютнер Б., Попов С. А., Проскуровский Д. И., Фогель Н. // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 75. Вып. 2. С. 84.
17. Месяц Г. А., Баренгольц С. А. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 75. Вып. 6. С. 306.
18. Smolanov N. A. // Journal of Surface Investigation. 2017. Vol. 11. No. 2. P. 353.
19. Смоланов Н. А., Неверов В. А. // Письма о материалах. 2015. Т. 5 (2). С. 179.
20. Smolanov N. A., Neverov V. A. // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. No. 3. P. 419.
21. Клеман М., Лаврентович О. Д. Основы физики частично упорядоченных сред: жидкие кристаллы, коллоиды, фрактальные структуры, полимеры и биологические объекты. – М.: Физматлит, 2007.
22. Smolanov N. A. // Journal of Surface Investigation. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 593.
23. Козырев А. В., Шишков А. Н. // ПЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 12. С. 33.
24. Gidalevich E., Goldsmith S., Voxman R. L. // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95. No. 6. P. 2969.
25. Недоспасов А. В. // УФН. 2015. Т. 185. С. 613.
26. Недоспасов А. В. // УФН. 1987. Т. 152. С. 479.
27. Арапов С. С., Волков Н. Б. // ПЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 1. С. 3.
28. Баренгольц С. А., Литвинов Е. А., Садовская Е. Ю., Шмелев Д. Л. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 6. С. 60.
29. Бакунин О. Г. // УФН. 2018. Т. 188. С. 55.
30. Франк А. Г., Кирий Н. П., Марков В. С., Воронова Е. В. / Тез. докл. XXXVII Междунар. (Звенигородской) конф. по физ. плазмы и УТС. – М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН». 2018. С. 188.

PACS: 52.80.Mg -52.27.Lw-52.35.-g

Current layers and fractals in arc discharge plasma

N. A. Smolanov

Ogarev Mordovia State University
68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russia
E-mail: smolanovna@yandex.ru

Received April 22, 2019

The analysis of processes in the vacuum arc plasma, which may lead to the formation and growth of fractal aggregates, has been carried out. The analysis is based on the results ob-

tained in the study of the cathode spot and the structure of dust particles of the arc discharge plasma. One of the possible reasons for the formation of fractal structures is the occurrence of current sheets and droplet spots when cathode spots approach each other. The ion flux between the approaching cathode spots of the arc discharge as they move along the plane of the sputtered cathode can be considered as a current layer. The magnetic field created by the current sheet is a source of energy. The dissipation of this energy means the creation of instability of the growth front. In this growth front, the formation of fractal-like aggregates can occur. This process can be attributed to the phenomenon of drift-dissipative instability. This is one of the types of plasma microinstability.

Keywords: arc discharge, plasma, cathode spot, drip spot, current layers, fractal aggregates, plasma instability.

REFERENCES

1. A. A. Lyubimov and V. I. Rakhovskiy, *Sov. Phys. Usp.* **125** (4), 665 (1978).
2. A. Anders, *Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation*. (Berkeley: Springer Science, 2008).
3. V. I. Gushenets, A. S. Bugaev, and E. M. Oks, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 19 (2017).
4. A. P. Glinov, A. P. Golovin, and P. V. Kozlov, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 26 (2017).
5. A. P. Glinov, A. P. Golovin, and K. V. Shaleev, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 21 (2018).
6. A. I. Morozov, *Introduction to Plasma Dynamics*. (M.: FIZMATLIT, 2008) [in Russian].
7. Yu. P. Raiser, *Gas discharge physics*. (Moscow, Nauka, 1992) [in Russian].
8. N. A. Smolanov, N. A. Pan'kin, V. V. Batin, and E. P. Pavkin, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 30 (2014).
9. V. I. Krauz, Yu. V. Martynenko, N. Yu. Svechnikov, V. P. Smirnov, V. G. Stankevich, and L. N. Khimchenko, *Physics Uspekhi*, **53**, 1015 (2010).
10. V. P. Budaev, *Letters to JETP* **106** (5), 284 (2017).
11. A. V. Nedospasov and G. V. Sergienko, in *Proc. XXXVII Intern. (Zvenigrodskoy) Conf.* (Moscow, PLAZMAIOFAN, 2010). P. 28.
12. N. A. Smolanov, *Journal of Physics: Conference Series* **857** (1), 012043 (2017).
13. V. Yu. Karasev, E. S. Dzlieva, S. I. Pavlov, L. A. Novikov, and I. Ch. Mashek, *Tech. Phys.* **89** (1), 50 (2019).
14. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 11 (2018).
15. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 36 (2018).
16. A. V. Batrakov, B. Juttner, S. A. Popov, D. I. Proskurovsky, and N. Vogel, *Letters to the JETP* **75** (2), 84 (2002).
17. G. A. Month and S. A. Barendolts, *Letters to JETP* **75** (6), 306 (2010).
18. N. A. Smolanov, *Journal of Surface Investigation* **11** (2), 353 (2017).
19. N. A. Smolanov and V. A. Neverov, *Pisma o Materialakh* **5** (2), 179 (2015).
20. N. A. Smolanov and V. A. Neverov, *Inorganic Materials: Applied Research*. **8** (3), 419 (2017).
21. M. Clement and O. D. Lavrentovich, *Fundamentals of physics of partially ordered media: liquid crystals, colloids, fractal structures, polymers and biological objects*. (Moscow, Fizmatlit, 2007) [in Russian].
22. N. A. Smolanov, *Journal of Surface Investigation* **12** (3), 593 (2018).
23. A. V. Kozyrev and A. N. Shishkov, *Letters to JETP* **28** (12), 33 (2002).
24. E. Gidalevich, S. Goldsmith, and R. L. Boxman, *J. Appl. Phys.* **95** (6), 2969 (2004).
25. A. V. Nedospasov, *Physics Uspekhi* **185**, 613 (2015).
26. A. V. Nedospasov, *Sov. Physics Uspekhi* **152**, 479 (1987).
27. S. S. Arapov and N. B. Volkov, *Letters to JETP* **29** (1), 3 (2003).
28. S. A. Barendolts, E. A. Litvinov, E. Yu. Sadovskaya, and D. L. Shmelev, *Tech. Phys.* **68** (6), 60 (1998).
29. O. G. Bakunin, *Physics Uspekhi* **188**, 55 (2018).
30. A. G. Frank, N. P. Kiriy, V. S. Markov, and E. V. Voronova, in *Proc. XXXVII Intern. (Zvenigrodskoy) Conf.* (Moscow, PLAZMAIOFAN, 2018). P. 188.