

Капельное пятно – новый объект в физике вакуумного разряда

А. В. Батраков¹⁾, Б. Юттнер⁺²⁾, С. А. Попов, Д. И. Проскуровский, Н. Фогель*²⁾

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, 634055 Томск, Россия

⁺Humboldt University Berlin, Institute of Physics, D-10117 Berlin, Germany

**University of Technology Chemnitz, Department of Physics, 09107 Chemnitz, Germany*

Поступила в редакцию 11 декабря 2001 г.

Экспериментально установлено, что при горении слаботочного (единицы и десятки ампер) импульсного (единицы микросекунд) вакуумного разряда вокруг некоторых капель, покидающих катодное пятно, образуются плазменные микросгустки, параметры плазмы которых (концентрация электронов $n_e \sim 10^{26} \text{ м}^{-3}$ и равновесная температура $T_e \sim 1 \text{ эВ}$) близки к параметрам плазмы катодного пятна. Полученные данные указывают на определяющую роль начальной температуры капель и термоэлектронной эмиссии с них в формировании таких плазменных микросгустков. Предложено классифицировать данные капельно-плазменные образования как “капельные пятна” по аналогии с известными в вакуумных разрядах “катодными” и “анодными” пятнами. В работе приводятся первые результаты исследования динамики образования и характеристик капельных пятен. Отмечается, что концепция капельных пятен потребует определенного уточнения механизмов плазмообразования в вакуумных разрядах.

PACS: 52.70.Kz, 52.80.Vp

Хорошо известно [1, 2], что при горении вакуумной дуги происходит эмиссия капель как результат выталкивания жидкого металла из кратера катодного пятна – эмиссионного центра (эктона [3]), обеспечивающего токоперенос из катода в разрядный промежуток. Закономерности генерации капель являются источником информации о процессах, происходящих в катодном пятне, что поддерживает определенный интерес к изучению данного явления. Одним из методов исследования эмиссии капель была и остается регистрация их свечения [4–6]. Однако до настоящего времени не анализировались ни спектр излучения капель, ни размер светящейся области. Обычно полагалось, что свечение капель вызвано лишь тепловым излучением их поверхности, поскольку все капли, покидающие катодное пятно, имеют достаточно высокую температуру. Нами экспериментально установлено, что свечение части объектов, покидающих катодное пятно, связано не с тепловым излучением капель, а с излучением плотной плазмы, окружающей капли.

Эксперименты проводились в условиях высоковакуума 10^{-7} торр. Между катодом и удаленным от него на 1–5 мм анодом зажигался импульсный дуговой разряд длительностью до 10 мкс и током 2–20 А. В экспериментах использовались галлий-индиевые жидкометаллические ка-

тоды двух типов – капиллярные, реализующие случай “глубокой” жидкости, когда течение жидкости практически не ограничивается вязкостью, и игольчатые, представляющие собой вольфрамовую иглу, покрытую тонкой пленкой жидкого металла. Также использовались твердотельные катоды (медь, вольфрам, тантал, графит), представляющие собой иглу. Ток разряда регистрировался 1-гигагерцевым осциллографом LeCroy. Свечение плазмы в катодной области разряда регистрировалось сверхскоростной камерой (до 100 млн. кадров/с) Imacon-468. Диапазон чувствительности данной камеры лежит в области спектра 200–700 нм. Для получения изображения на входе камеры использовался длиннофокусный микроскоп QUESTAR QM-100 с диапазоном спектральной чувствительности 200 нм–3.5 мкм. Оптическое разрешение аппаратуры было не хуже 3 мкм. Изображения свечения плазмы регистрировались либо без светофильтра, либо с использованием 350-нанометрового интерференционного (ширина 10 нм) светофильтра.

В экспериментах нам удалось неоднократно фиксировать процесс отрыва капли от поверхности катода при горении катодного пятна слаботочной импульсной вакуумной дуги. На рис.1 приведен типичный пример такого наблюдения.

В этих экспериментах полной неожиданностью явилось появление ярких объектов, покидающих катод. Светимость этих объектов была соизмерима со светимостью катодного пятна, либо даже превосхо-

¹⁾e-mail: batrakov@Lve.hcei.tsc.ru

²⁾B. J. Jüttner, N. I. Vogel.

Рис.1. Процесс отрыва капли от игольчатого жидкометаллического катода. Светлые клинья на изображениях – артефакты, связанные с подсветкой промежутка гелий-неоновым лазером. Интервалы времени, в которые осуществлялась экспозиция, указаны на кадрах. Время отсчитывается от начала разряда

дила ее (рис.2). Данный процесс наблюдается крайне редко при горении дуги на глубокой жидкости. Его вероятность можно оценить как 1 событие за 300 мкс горения дуги током в единицы ампер. Для случая тонкой жидкой пленки на тугоплавкой подложке вероятность этого процесса для тех же условий горения дуги была на порядок величины больше, что позволило выяснить ряд характерных признаков этого явления.

Светящиеся объекты движутся прямолинейно и не отклоняются внешним магнитным полем с индукцией 0.15 Тл. Скорость перемещения светящихся объектов лежит в пределах 10 – 100 м/с, что является типичным для скоростей капель, наблюдаемых ранее [5 – 8]. Однако эти объекты имеют размеры в пределах 10 – 100 мкм, что на порядок величины превосходит максимальные размеры капель, эмиттированных катодным пятном при токах вакуумного разряда, близких к пороговому току дуги [7]. Кроме того, данные объекты не имеют резко очерченных границ. Эти факты указывают на то, что данные объекты представляют собой капли, окруженные плотной

плазмой. При этом наблюдаемое свечение связано с излучением окружающей каплю плазмы в видимом диапазоне света.

Удивительным фактом является “рождение” светящихся объектов на значительном удалении от катодного пятна. На рис.3 приведен пример такого сценария. Кадры получены при горении дуги током 5 – 10 А на игольчатом жидкометаллическом катоде. Хорошо видно, что самый нижний из светящихся объектов, зафиксированных на третьем кадре (экспозиция 3 – 4 мкс), не наблюдается на предыдущем кадре. Принимая во внимание отсутствие интервала времени между окончанием предыдущего и началом последующего кадров, можно сделать вывод, что “возгорание” капли произошло не в области катодного пятна, а на некотором расстоянии от него (~ 70 мкм).

Вероятность появления “горящих” капель оказалась сильно зависящей от материала катода, возраста с ростом его температуры плавления. Так, например, для медного катода появление “горящих” капель не является редким событием и наблюдается в каждом акте горения дуги длительностью ~ 10 мкс

Рис.2. Формирование светящегося объекта при горении разряда на галлий-индиевом катоде и осциллограмма тока, соответствующая этому процессу

током в единицы ампер. Для тугоплавких же металлов многие капли являются “горящими” по характеру своего свечения (рис.4а).

Для “горящих” капель характерна высокая светимость в УФ области спектра, соизмеримая со светимостью катодного пятна (рис.4b-d), что также указывает на нетепловой характер свечения данных объектов.

Характерной особенностью горения дуги, представленного на рис.4а, является циклический характер генерации “горящих” капель (генерация капель происходит слоями). Данное наблюдение является хорошей иллюстрацией известного факта цикличности процессов на катоде при вакуумном разряде [1–3]. Циклический характер процессов в катодном пятне иногда проявляется в мерцании “горящих” капель (рис.4с)³⁾. Рис.4d иллюстрирует случай одного из наиболее удаленных “воспламенений” капли. Все отмеченные выше особенности свечения также указывают на то, что яркие светящиеся объекты, наблюда-

емые в эксперименте, являются плотными плазменными сгустками, окружающими капли.

С целью измерения параметров плазмы “горящих” капель были выполнены дополнительные эксперименты с применением пикосекундной лазерной интерферометрии в сочетании с теневой абсорбционной фоторегистрацией. Лазерная интерферометрия плазмы позволяет измерять коэффициент преломления плазмы и, следовательно, концентрацию электронной компоненты плазмы, n_e [9]. Предполагая, что форма исследуемого плазменного сгустка имеет осевую симметрию, для восстановления пространственного распределения n_e можно воспользоваться обратным преобразованием Абея. Для реализации метода лазерной интерферометрии нами использовались комплекс аппаратуры и методики, подробно описанные в [10]. Длина волны зондирующего излучения была 532 нм, а длительность импульса – 100 пс. Чувствительность аппаратуры, реализующей данный метод измерения параметров плазмы, в наших экспериментах позволяла регистрировать концентрации электронной компоненты плазмы в пределах $10^{25} - 10^{27} \text{ м}^{-3}$ при характерных разме-

³⁾ В обоих случаях период цикла ~ 1 мкс.

Рис.3. Формирование плазменных сгустков вблизи галлий-индиевого пленочного катода

рах исследуемого плазменного сгустка 10 мкм. Из-за малости размеров исследуемых объектов и высокой степени неидеальности плазмы при получении численных значений концентраций мы можем гарантировать только порядок измеряемых величин.

На рис.5а приведена интерферограмма катодного пятна на графитовом катоде. Данная интерферограмма содержит две особенности, расположенные внутри области, ограниченной белой окружностью. Первая особенность соответствует линии с индексом 1. Следующая линия имеет лишь незначительные отклонения от прямолинейности, что свидетельствует об отсутствии плазмы, плотность которой достаточно велика для регистрации. Линия 3 снова содержит отклонение, соответствующее сдвигу фазы зондирующего луча. Линия 4 подобна линии 2. На рис.5б приведено пространственное распределение концентрации электронной компоненты плазмы, полученное путем компьютерной обработки интерферограммы, представленной на рис.5а. Очевидно, что верхний плазменный сгусток соответствует катодному пятну вакуумного разряда. Нижний же представляет собой самостоятельное плазменное образование, зна-

чения n_e которого мало отличаются от значений n_e в катодном пятне и составляют величину $\sim 10^{26} \text{ м}^{-3}$.

Подобные плазменные сгустки мы наблюдали как в непосредственной близости к катоду, так и на значительном расстоянии от него (до 100 мкм). Такие сгустки нами регистрировались также на жидкометаллическом игольчатом катоде. Задержка появления сгустков составляет 0.5 – 1 мкс от начала разряда. Оцененная максимальная скорость перемещения сгустков не превосходит 100 м/с.

Подобные сгустки наблюдались нами и при регистрации абсорбционных теневых изображений, полученных в одном экспериментальном цикле с лазерной интерферометрией. На рис.6 приведен пример абсорбционного изображения плазменного сгустка, эмиттированного катодным пятном. Из рисунка видно, что плазменные сгустки могут содержать в центре плотное ядро, для которого величина оптической толщины больше 4, что соответствует практически непрозрачной среде. Такая среда может быть интерпретирована либо как конденсированное вещество капли, либо как плазма, плотность которой больше критического значения, при котором происходит

Рис.4. Светящиеся плазменные сгустки на танталовом (а) и вольфрамовом (b-d) катодах при токах дуги 2 – 5 А. Кадры (b-d) получены с использованием узкополосного (10 нм) интерференционного светофильтра на длину волны 350 нм

полное внутреннее отражение зондирующего излучения. В разряде наблюдались также плотные плазменные сгустки без ядра. Однако это не исключает существования внутри сгустка ядра либо нескольких ядер, размеры которых слишком малы (менее 1 мкм) для их оптической регистрации. Характерные размеры, времена появления и оценки максимальной скорости плазменных сгустков, наблюдаемых в абсорбционных экспериментах, аналогичны характеристикам объектов, наблюдаемых на интерферограммах. Это дает основание полагать, что мы наблюдаем одни и те же объекты. В этом случае, зная значения n_e , полученные из интерферограмм, и измеренные значения коэффициентов абсорбции, мы можем восстановить значения температуры плазмы как катодного пятна, так и плотных плазменных сгустков, наблюдаемых на удалении от катода [11]. Оказалось, что T_e как в катодных пятнах, так и в сгустках имеет величину порядка 1 эВ для всех наших наблюдений. Эта величина T_e значительно ниже как оцененной из зарядового состава с использованием уравнения Саха [12–14], так и измеренной зондовым методом [15]. В то же время наши результаты хорошо

согласуются как с данными экспериментов по том-псонскому рассеянию лазерного излучения на электронах плазмы катодного пятна (1.4 ± 0.2 эВ [16]), так и со спектроскопическими измерениями (0.8 – 2 эВ [17]). Возможно, это связано с тем, что оптические методы диагностики плазмы имеют наибольшую чувствительность в области больших концентраций плазмы. По-видимому, джоулев разогрев плазмы до температуры ~ 4 эВ происходит в области более низких концентраций на большем удалении от поверхности.

Таким образом, мы имеем результаты трех серий экспериментов, однозначно указывающих на то, что в области катодного пятна вакуумного дугового разряда происходит образование плотных плазменных микросгустков. Характер движения этих сгустков и наличие внутри них плотного конденсированного ядра указывают на то, что эти сгустки являются результатом процесса интенсивного плазмообразования при испарении капель, эмиттируемых катодным пятном. При этом n_e и T_e плазмы, окружающей каплю жидкого металла, идентичны параметрам плазмы катодного пятна.

Рис.5. Интерферограмма эмиссионного центра на графитовом катоде (а) при токе дугового разряда 20 А и пространственное распределение концентрации электронной компоненты плазмы, соответствующее данной интерферограмме, (b)

Процесс образования плотной плазмы вокруг капель, погруженных в менее плотную плазму, рассмотрен в работе [18]. Если капля относительно “холодная” и ее температура недостаточно высока для

заметной термоэмиссии электронов, то, находясь в плазме катодного пятна, она ведет себя как “плавающий” зонд, быстро приобретая “плавающий” потенциал, отрицательный по отношению к потенциа-

Рис. 6. Абсорбционное изображение галлий-индиевого катода (а) при токе дугового разряда 20 А, изображение этого же катода без разряда (б) и результат их разности (с)

лу плазмы. В этих условиях нагрев капли плазменными электронами “хвоста” максвелловского распределения малоэффективен из-за ограниченности ионного тока на каплю. Если же капля исходно “горячая”, то вследствие термоэлектронной эмиссии с капли она становится “эмиттирующим” зондом и ее потенциал относительно плазмы оказывается положительным. Это приводит к увеличению потока плазменных электронов на каплю и, как следствие, резкому росту ее температуры. При этом, как показали расчеты, выполненные в [18], унос тепла за счет испарения атомов и излучения уже не компенсирует поток тепла из плазмы на каплю, и температура капли растет до температур порядка 5000–7000 К, пока поток тепла на каплю не уравнивается уносом тепла эмиттированными с капли электронами.

На ключевую роль эмиссии электронов с поверхности капли в механизме ее “возгорания” указывает тот факт, что вероятность этого явления существенно возрастает с увеличением температуры плавления

материала катода. Идентичность параметров плазмы катодного пятна и плазменных сгустков вокруг капель и наличие интенсивной электронной эмиссии с капель в процессе плазмообразования дают основание классифицировать такие капельно-плазменные сгустки как “капельные пятна” по аналогии с “катодными пятнами” на катоде и “анодными пятнами” на аноде, формирующимися при вакуумных разрядах.

Можно полагать, что капельное пятно имеет некоторые черты катодного пятна униполярной дуги, поскольку в обоих случаях источником энергии, питающей такое пятно, является энергия окружающей электрод плазмы. В то же время, капельное пятно имеет некоторые черты катодного пятна каскадной дуги, поскольку часть тока, благодаря эмиссии электронов из плазмы на каплю и термоэлектронной эмиссии с капли, оказывается замкнутой на каплю. Концепция капельных пятен потребует более детального изучения условий их образования и функционирования, а также определенного уточнения механиз-

мов плазмообразования в вакуумных разрядах. Можно ожидать, что при горении дуги на тугоплавких металлах значительная часть микрокапель “сгорает” в прикатодной области. Также можно ожидать, что капельные пятна, двигаясь над поверхностью катода, могут оказывать влияние на процесс иницирования новых эмиссионных центров (эктонов) и тем самым на движение катодных пятен в целом.

Работа выполнялась при поддержке фонда INTAS и Российского фонда фундаментальных исследований (совместный проект # IR-97-663) и Министерства науки и образования Германии (проект # WTZ RUS 99/185). Авторы выражают признательность академику РАН Г. А. Месяцу и А. В. Козыреву за интерес к работе и плодотворные дискуссии.

1. Е. А. Литвинов, Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский, УФН **139**, 265 (1983).
2. В. Jüttner, Beitr. Plasmaphys. **19**, 25 (1979).
3. Г. А. Месяц, *Эктоны в вакуумном дуговом разряде: пробы, искра, дуга*, М.: Наука, 2000.

4. J. E. Daalder, J. Phys. **D9**, 2379 (1976).
5. А. Г. Головейко, Изв. ВУЗов. Энергетика **6**, 83 (1966).
6. T. Schulke and A. Anders, Plasma Sources Sci. Technol. **8**, 567 (1999).
7. T. Utsumi and J. H. English, J. Appl. Phys. **46**, 126 (1975).
8. S. A. Popov, D. I. Proskurovsky, and A. V. Batrakov, IEEE Trans. Plasma Sci. **27**, 851 (1999).
9. Л. Н. Пятницкий, *Лазерная диагностика плазмы*, М.: Атомиздат, 1976.
10. N. Vogel, J. Heinzinger, and F. Cichos, IEEE Trans. Plasma Sci. **23**, 926 (1995).
11. N. Vogel and V. Skvortsov, IEEE Trans. Plasma Sci. **25**, 553 (1997).
12. E. Hantzsche, Contrib. Plasma Phys. **19**, 59 (1979).
13. A. Anders, Phys. Rev. **E55**, 969 (1997).
14. Р. Б. Бакшт, А. П. Кудинов, Е. А. Литвинов, ЖТФ **43**, 146 (1973).
15. V. F. Puchkarev, J. Phys. **D24**, 685 (1991).
16. Р. Б. Бакшт, Б. А. Кабламбаев, Г. Т. Раздобарин, Н. А. Ратахин, ЖТФ **49**, 1245 (1979).
17. Г. А. Любимов, В. И. Раховский, УФН **125**, 665 (1978).
18. А. В. Козырев и А. Н. Шишков, готовится к печати.