

## ДУГОВОЙ РАЗРЯД В ВАКУУМЕ С ГАЗОНАПОЛНЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

*А.А.Логачев, С.М.Школьник*

1. Характеристики вакуумной дуги с катодом из металла, наполненного водородом до  $X \sim 1$  ( $X$  — отношение числа атомов водорода к числу атомов металла в образце) существенно отличаются от дуги с обезгаженными электродами. Газонаполненные металлы использовались ранее в вакуумной коммутационной аппаратуре, но только для поджигающих устройств [1], а не в качестве электродов основного разряда. Разряд с газонаполненными электродами (ГНЭ) остался неизученным.

2. Исследования проводились в разряде, который питался специальным генератором прямоугольных импульсов напряжения амплитудой  $U = 115$  В и регулируемой длительности  $t < 5$  мс, выдерживающим нагрузки  $1 < 6$  кА. Ток регулировался балластным сопротивлением. Разряд поджигался в вакууме ( $p \sim 10^{-3}$  Па) при непрерывной откачке. Электроды торцевые диаметром  $2R_0 = 20$  мм, межэлектродное расстояние  $H = (1 - 12)$  мм. Катоды и аноды изготавливались из бескислородной меди. На торце катодов имелся слой титана толщиной 2, 10 или 45 мкм, наполненного дейтерием до  $X \sim 1$ . В контрольных экспериментах использовались медные катоды без покрытия и катоды из специально обезгаженного титана ВТ-1. Разряд поджигался в центре катода обрывом тока во вспомогательной цепи [2]. С помощью осциллографов С9-8 регистрировались ток и напряжение разряда. камерой ВФУ-1 проводилась скоростная фоторегистрация (СФР) процессов на катоде. Эрозия металла определялась весовым методом, а расход газа — по изменению давления после разряда в камере с перекрытой откачкой.

3. Известно, что в разряде с обезгаженными электродами время существования разряда с относительно низким уровнем шумов определяется током, размерами и материалом электродов, величиной межэлектродного промежутка [3]. Например, при  $I = 5$  кА,  $2R_c = 20$  мм,  $H = 8$  мм для катода из обезгаженного титана  $\tau \sim 180 - 200$  мкс, из меди —  $\tau \sim 300 - 320$  мкс. В разряде с ГНЭ низкий уровень шумов сохраняется в течение всего импульса, даже если его длительность достигает максимальной доступной в наших

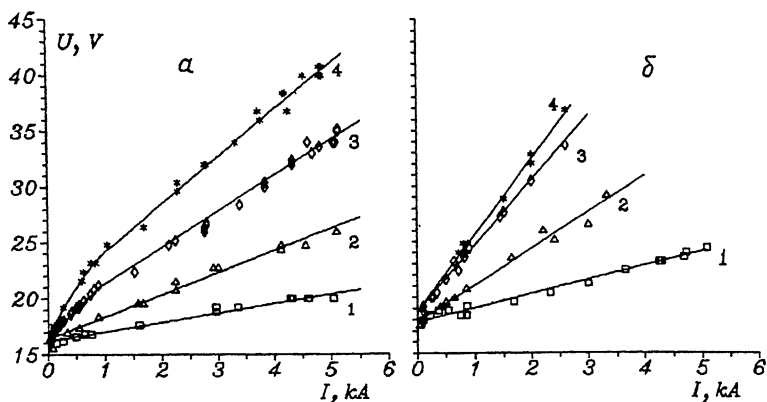


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики.

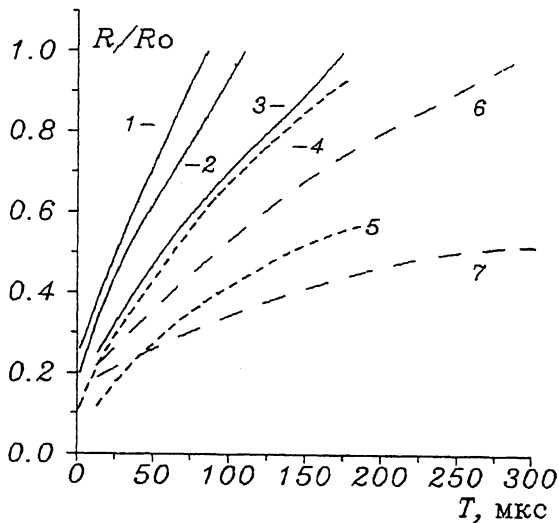
*a* — газонаполненные электроды, *b* — обезгаженный титан. 1 — межэлектродный промежуток  $H = 1$  мм, 2 — 3, 3 — 8, 4 — 12 мм.

экспериментах величины  $t = 5000$  мкс. На начальных стадиях развития разряда скорость нарастания тока при использовании ГНЭ существенно выше, чем обезгаженных. В частности, при указанных выше параметрах максимальное значение  $dI/dt \sim 3 \cdot 10^8$  А/с и  $\sim 1.5 \cdot 10^8$  соответственно (на нашей установке максимальная скорость нарастания тока в закороченном разряднике  $\sim 4 \cdot 10^8$  А/с).

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) разрядов с ГНЭ и обезгаженными электродами показаны на рис. 1 (приведены квазистационарные ВАХ, т.е. соотношение между  $U$  и  $I$  на плато разрядного импульса; для обезгаженных электродов — непосредственно перед возрастанием шумов). Напряжение на разрядке с ГНЭ при уменьшении тока стремится к значению, которое приблизительно на 1.5 В ниже, чем на обезгаженном электроде. Наклон ВАХ существенно отличается. Отметим наличие двух участков с различными наклонами ВАХ разряда с ГНЭ, особенно четко выраженное при больших  $H$ .

Одной из важнейших характеристик сильнооточного вакуумного дугового разряда является критический для образования анодного пятна ток  $I_c$ . В разряде с обезгаженным титаном при  $H = 3$  мм  $I_c \sim 4$  кА, а при  $H = 8$  мм  $I_c \sim 3$  кА. В разряде с ГНЭ образование анодного пятна нами не наблюдалось при этих значениях  $H$  вплоть до максимального тока, обеспечиваемого источником питания  $I = 6$  кА.

4. Описанные особенности электрических характеристик разряда ГНЭ отчасти проясняются при сопоставлении с результатами исследования процессов на катоде. Известно, что после возбуждения разряда на обезгаженных элект-



**Рис. 2.** Газонаполненные электроды: 1 —  $I = 4.5$ , 2 — 2.4, 3 — 1.4 кА. Обезгаженные электроды: 4, 5 — Ti; 6, 7 — Cu. 4 —  $I = 4.5$ , 5 — 1.4, 6 — 4.3, 7 — 1.4 кА.

тродах образуется и четко воспроизводится от импульса к импульсу кольцевая структура катодных пятен, радиус которой  $R$  растет со временем [4]. Анализ данных СФР показал, что на ГНЭ образуется не кольцо, а круг практически однородно заполненный катодными пятнами, радиус которого растет со временем при прочих равных условиях значительно быстрее, чем радиус кольца на обезгаженных электродах (рис. 2). Большая скорость расширения круга пятен обеспечивает большую скорость нарастания тока и соответственно быстрое достижение током квазистационарного значения в разряде с ГНЭ.

На обезгаженном материале диаметр кольца пятен становится равным диаметру катода за время  $\tau$  (например, на титане при  $I = 5$  кА,  $\tau = 200$  мкс (рис. 2)), а при  $t > \tau$  большая часть пятен переходит на боковую поверхность катодного цилиндра. Катодные струи вытекают во вне межэлектродного промежутка, горение разряда становится неустойчивым, возрастает уровень шумов. На ГНЭ пятна, быстро распространившись по катоду, даже при максимальном токе остаются на торце (на газонаполненном покрытии) в течение всего импульса (до 5000 мкс), а потому уровень шумов остается низким.

Съемка катода при  $I \sim 100$  А позволила оценить ток, пропускаемый одним пятном на ГНЭ:  $I_s = (15 - 20)$  А. Это существенно меньше, чем на обезгаженном титане  $I_s = 70$  А [5]. Характер эрозионных повреждений, видимых в микро-

скоп, также сильно отличается. На обезгаженном Ti даже при небольшом увеличении ясно видны катодные кратеры. На ГНЭ вплоть до увеличения 100 поверхность выглядит лишь слегка шероховатой. Четких количественных данных по эрозии в капельной фазе мы не имеем, однако можно утверждать, что в разряде с ГНЭ она не выше, чем с обезгаженным титаном. Измерения коэффициента электропереноса для титана в разряде с ГНЭ дают  $\lesssim 3 \cdot 10^{-5}$  против  $= 5 \cdot 10^{-5}$  г/Кл на обезгаженном титане [5]. Расход газа составляет  $\lesssim 6$  атомов дейтерия на 1 атом титана при токе  $I = 1.4$  кА. Это говорит о том, что газ выделяется не только в результате разрушения кристаллической решетки при горении пятна (напомним, что  $X \gtrsim 1$  атом D на атом Ti), но, по-видимому, под действием ионной бомбардировки во время горения разряда выходит из поверхности катода, окружающей пятно. Ресурс ГНЭ отнюдь не мал. При покрытии 50 мкм на электродах  $\varnothing 20$  мм он составляет  $\sim 10^3$  Кл.

5. Полученные результаты и представляющееся разумным предположение, что большая часть освобождающегося из объема покрытия газа не имеет высоких направленных скоростей, позволяют думать, что использование ГНЭ облегчает компенсацию пространственного заряда электронов, эмиттируемых катодом. Это приводит к образованию в межэлектродном промежутке более глубокой ямы для электронов, то есть к формированию большего по абсолютной величине, чем в разряде с обезгаженным катодом, отрицательного анодного падения потенциала. Возможно, что этим объясняются наблюдаемые отличия ВАХ. Большее по абсолютной величине отрицательное анодное падение, а также очевидное уменьшение потерь ионов, обеспечиваемое равномерным распределением катодных пятен по покрытию и их тенденцией не покидать газонаполненное покрытие, приводит к существенному увеличению  $I_c$  в разряде с ГНЭ.

6. Описанные особенности позволяют надеяться на успешное использование ГНЭ в коммутационной аппаратуре. Изучение разряда с ГНЭ представляет интерес с нашей точки зрения еще и потому, что в плазменных устройствах, использующих водород в качестве плазмообразующего вещества, металлические поверхности контактирующие с плазмой, с необходимостью насыщаются водородом. Например, при исследовании условий и причин образования униполярных дуг на первой стенке и т.п. установок для УТС это обстоятельство следует учитывать.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93-02-17416).

## Список литературы

- [1] *Laferty J.M.*, // Proc. IEEE. 1966. V. 54. N 1. P. 21-32.
- [2] *Shkol'nik S.M.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 1985. V. PS-13. N 5. P. 336-338.
- [3] *Afanas'ev V.P., Djuzhev G.A., Shkol'nik S.M., Yur'ev V.G.* // Proc. XIII ISDEIV. Paris, 1988. P. 220-222.
- [4] *Sherman I.C., Webster R., Holmes R.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1975. V. 8. N 6. P. 696-702.
- [5] *Kimblin C.W.* // J. Appl. Phys. V. 44. P. 3074-3081.

Физико-технический  
институт им.А.Ф.Иоффе  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
24 ноября 1993 г.

---