

УДК 537.525.99

Разбрызгивание материала электродов при высоковольтном наносекундном разряде в дейтерии, водороде, гелии и аргоне низкого давления

Д.А. Сорокин¹, М.И. Ломаев^{1,2}, В.Ф. Тарасенко¹, Б.А. Нечаев³,
В.Н. Падалко³, Е.Н. Шувалов^{3*}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 15.10.2013 г.

В условиях формирования высоковольтного наносекундного разряда в промежутке, заполненном дейтерием, водородом, гелием или аргонном при давлении 1–60 торр, зарегистрировано разбрызгивание материала электродов. В качестве потенциального электрода использовался цилиндр, боковая поверхность которого состояла из тонких расщепленных на концах вольфрамовых проволочек, а заземленным электродом являлась плоская мишень из дейтерированного циркония. Разбрызгивание материала наблюдалось преимущественно с потенциального электрода при обеих полярностях генератора высоковольтных импульсов на протяжении. Повышение давления газовой среды в разрядной камере приводило к сокращению длины треков, оставляемых разлетающимися с электродов горячими светящимися каплями.

Ключевые слова: разбрызгивание материала, высоковольтный наносекундный разряд, дейтерированная мишень, трек; material splashing, high-voltage nanosecond discharge, deuterated target, track.

Введение

Разбрызгивание материала при высокоэнергетичных воздействиях имеет место в различных условиях. Так, например, при сваривании металлов дуговым разрядом происходит разбрызгивание горячих капель материала электродов вследствие их плавления в результате протекания через них большого тока. В работе [1] разбрызгивание материала титанового и вольфрамового электродов в виде светящихся капель наблюдалось в условиях формирования вакуумной дуги.

В работе [2] обсуждается решение проблемы, связанной с выбором материала, который будет использоваться для изготовления дивертора и первой стенки при создании термоядерного реактора на основе токамака ИТЭР. Это связано с тем, что в данном случае имеет место интенсивное плазменно-тепловое воздействие как в стационарном режиме работы токамака, так и во время переходных плазменных процессов на указанные элементы, что представляет угрозу их макроскопической эрозии.

В результате воздействия на вольфрамовую мишень потоком водородной плазмы, несущей тепловую нагрузку выше порога плавления, но ниже порога кипения вольфрама, происходит разбрызгивание материала мишени в виде светлых треков разлетающихся капель. Причем по мере роста энергии разбрызгивание материала мишени становится интенсивнее.

В работе [3] исследовалась возможность генерации интенсивного потока нейтронов наносекундной длительности в условиях высоковольтного наносекундного разряда при высоких перенапряжениях в промежутке, заполненном дейтерием при давлении единицы торр, электродами в котором являлись вольфрамовый потенциальный цилиндр и мишень из дейтерированного циркония. Эксперимент показал, что разбрызгивание материала электродов наблюдалось в виде светящихся линий, расходящихся от ярких пятен на них.

В настоящей статье рассмотрено поведение светящихся треков, зарегистрированных в промежутке в результате разбрызгивания материала электродов при высоковольтном наносекундном разряде в газах пониженного давления.

Установка и методики

Использовалась экспериментальная установка, подобная той, что описана в [4]. Она включала

* Дмитрий Алексеевич Сорокин; Михаил Иванович Ломаев (lomaev@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Федотович Тарасенко (vft@loi.hcei.tsc.ru); Борис Александрович Нечаев; Владимир Николаевич Падалко; Евгений Николаевич Шувалов.

в себя систему откачки и напуска газов. Источником высоковольтных импульсов напряжения служил генератор РАДАН-220 [5]. Волновое сопротивление генератора составляло 20 Ом. В режиме холостого хода он формирует импульсы напряжения с амплитудой ~250 кВ. Длительность импульса на полувысоте при согласованной нагрузке ~2 нс при длительности фронта в передающей линии ~0,5 нс. Конструкция генератора позволяла прикладывать к разрядному промежутку импульсы напряжения положительной и отрицательной полярности. Работа генератора осуществлялась в режиме единичных импульсов.

Генератор подключался к металлической разрядной камере в форме цилиндра диаметром 56 мм. Нагрузкой служил газоразрядный промежуток длиной 5 мм, который заполнялся дейтерием, водородом, гелием и аргоном. В ходе экспериментов давление газовой среды в камере изменялось от 1 до 60 торр. Разрядные промежутки представлены на рис. 1.

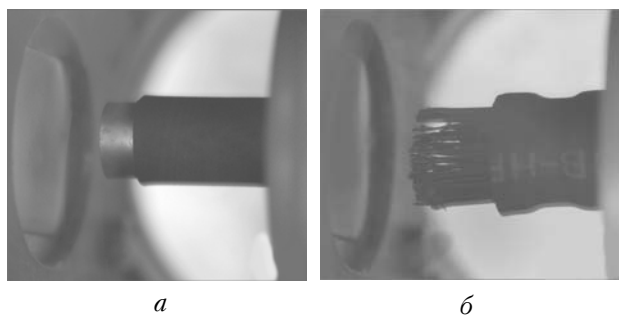


Рис. 1. Разрядный промежуток. Потенциальный электрод: *a* — стальная трубочка ($\varnothing \sim 6$ мм); *б* — вольфрамовый цилиндр ($\varnothing \sim 8$ мм). Плоский заземленный электрод — дейтерированная циркониевая пластинка. Межеlectродное расстояние 5 мм

В качестве потенциальных электродов использовались трубочка ($\varnothing \sim 6$ мм) из нержавеющей стали толщиной 100 мкм и электрод в форме цилиндра ($\varnothing \sim 8$ мм), боковая поверхность которого состояла из тонких ($\varnothing \sim 0,2$ мм) вольфрамовых проволочек, расщепленных на конце на 3–5 нитей (рис. 2). Заземленным электродом служила плоская мишень из дейтерированного циркония (ZrD_2), размещенная на алюминиевой металлической пластине.

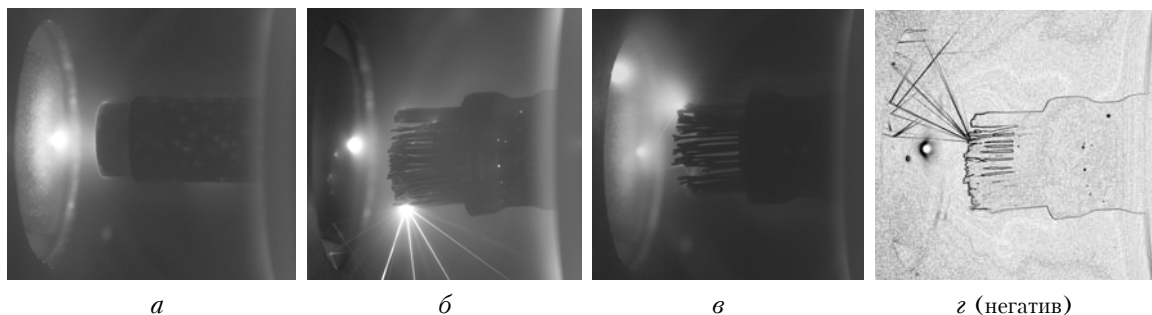


Рис. 3. Межеlectродные промежутки при высоковольтном наносекундном разряде в дейтерии. Давление дейтерия ~1 торр. Межеlectродное расстояние 5 мм. Катод — мишень ZrD_2 ; *a* — анод — стальная трубочка; *б–г* — анод — вольфрамовый цилиндр

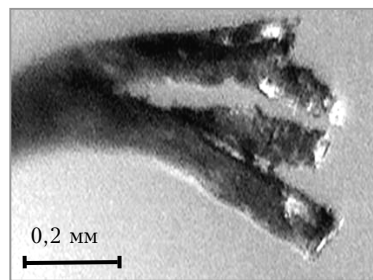


Рис. 2. Расщепленный конец вольфрамовой проволочки

Свечение разряда в камере фотографировали при помощи цифрового фотоаппарата SONY A100 при экспозиции 1 с.

Экспериментальные результаты

Следует сказать, что изначально задача возбуждения дейтерия низкого давления высоковольтным наносекундным разрядом в коротком (5 мм) промежутке, где потенциальным является электрод с малым радиусом кривизны (стальная трубочка), а заземленным — дейтерированная пластинка, заключалась в исследовании генерации наносекундных потоков нейтронов. Замена стального трубчатого электрода на вольфрамовый электрод специальной конфигурации, с целью увеличения интенсивности нейтронного потока, привела к тому, что на фотографиях свечения разряда в камере стали наблюдаться яркосветящиеся линии, берущие начало от ярких пятен на вольфрамовом электроде (рис. 3, *б*). В случае, когда потенциальным электродом являлась стальная трубочка, светящиеся линии отсутствовали (рис. 3, *а*). Кроме того, иногда яркие пятна с расходящимися от них светящимися линиями наблюдаются не только на электроде с малым радиусом кривизны, но и на плоском электроде (рис. 3, *в*). В случае использования в качестве заземленного электрода алюминиевой пластины яркосветящиеся линии распространялись только со стороны острейшего электрода. Из рис. 3, *г* видно, что светящиеся линии, начинающиеся на потенциальном электроде, могут менять направление как у противоположного электрода, так и в случае взаимодействия с поверхностью диэлектрика и других вольфрамовых нитей.

Можно предположить, что в данных условиях имеет место локальное (вероятно, на микронеоднородностях) выделение большого количества тепловой энергии на поверхности электродов вследствие протекания большого тока. В результате этого происходит разбрызгивание горячих светящихся капель материала электрода, которые при движении формируют треки. Судя по характеру изменения направления треков вблизи поверхностей (см. рис. 3, *з*) можно говорить о том, что при движении капли остывает и затвердевает. Это проявляется в виде упругого взаимодействия частицы с поверхностью. Направление трека изменяется таким образом, как если бы падающая на поверхность частица отражалась от нее под углом, равным углу падения. В большинстве случаев реализуется именно такая ситуация.

Отметим, что изменение полярности импульса напряжения, прикладываемемого к межэлектродному промежутку от генератора, не приводит к прекращению наблюдаемого явления (рис. 4).

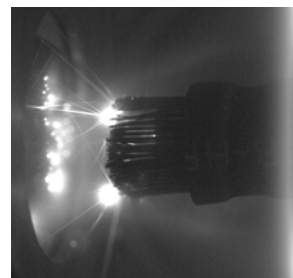


Рис. 4. Межэлектродный промежуток при высоковольтном наносекундном разряде в дейтерии. Вольфрамовый цилиндр – катод. Давление дейтерия ~3 торр. Межэлектродное расстояние 5 мм

Помимо дейтерия, треки наблюдались при возбуждении высоковольтным наносекундным разрядом водорода, гелия и аргона (рис. 5). В указанных газах явление происходило реже, чем в дейтерии.

Увеличение давления газа (дейтерия, водорода) в разрядной камере приводило к сокращению длины треков (рис. 6).

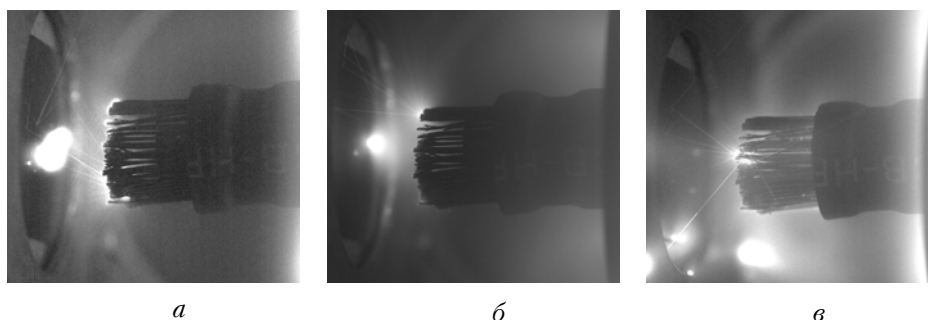


Рис. 5. Межэлектродный промежуток при высоковольтном наносекундном разряде в водороде (*а*), гелии (*б*), аргоне (*в*). Вольфрамовый цилиндр – анод. Давление газа ~3 торр. Межэлектродное расстояние 5 мм

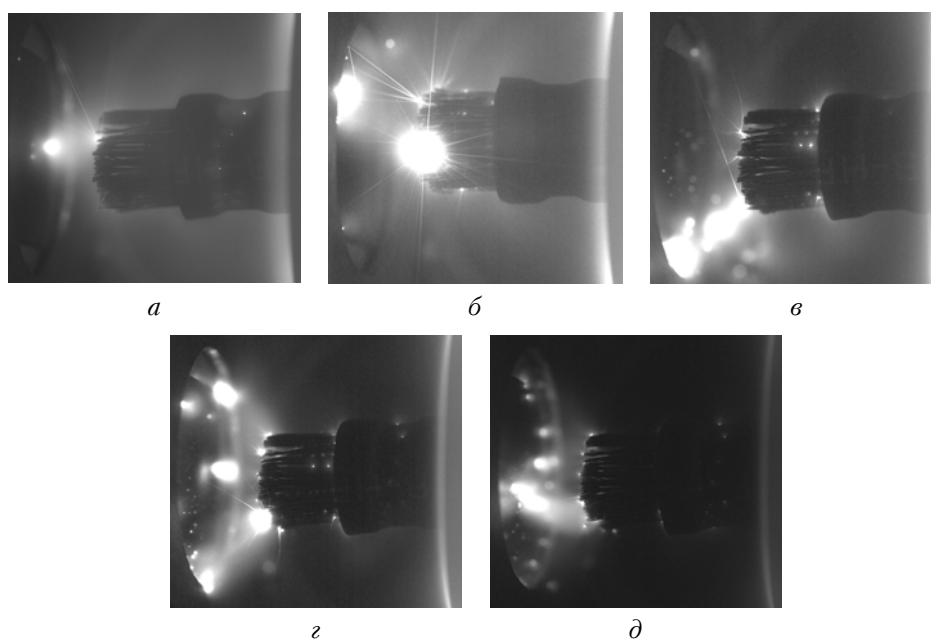


Рис. 6. Межэлектродный промежуток при высоковольтном наносекундном разряде в дейтерии. Давление дейтерия: *а* – ~1 торр; *б* – ~3 торр; *в* – ~15 торр; *г* – ~30 торр; *д* – ~60 торр. Вольфрамовый цилиндр – анод. Межэлектродное расстояние 5 мм

При давлении ~60 торр свечение, идентифицирующее трек прекращалось в непосредственной близости от потенциального электрода (см. рис. 6, *д*). Необходимо отметить, что уменьшение длины треков при росте давления наблюдается в случае обеих полярностей генератора.

Заключение

В результате проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

При высоковольтном наносекундном разряде в дейтерии, водороде, гелии и аргоне низкого давления, при использовании в качестве потенциального электрода вольфрамового цилиндра, а заземленного — дейтерированной циркониевой пластинки, наблюдается разбрызгивание материала электродов в виде треков, распространяющихся от яркосветящихся пятен на поверхности электродов.

Разбрызгивание материала происходит преимущественно с поверхности вольфрамового электрода и не зависит от того, какой полярности импульс напряжения прикладывается к разрядному промежутку.

Изменение давления газовой среды в разрядной камере приводит к уменьшению длины треков. Если при давлении ~1 торр длина трека составляет единицы сантиметров, то уже при давлении ~60 торр его свечение, идентифицирующее трек, прекращается на расстоянии долей миллиметра от поверхности электрода.

Характер изменения направления треков позволяет предположить, что в данном случае происходит разбрызгивание материала электрода в виде горячих капель, которые при движении в газе остывают и затвердевают.

1. *Batratov A.V., Jüttner B.J., Popov S.A., Proskurovsky D.I., Vogel N.I.* Droplet spot as a new object in physics of vacuum discharge // JETP Lett. 2002. V. 72, N 2. P. 76–82.
2. *Климов Н.С., Подковыров В.Л., Житлухин А.М., Сафронов В.М., Коваленко Д.В., Москачева А.А., Позняк И.М.* // Вопр. атом. науки и техн. Сер. Термоядерный синтез. 2009. Вып. 2. С. 52–61.
3. *Ломаев М.И., Нечаев Б.А., Падалко В.Н., Дудкин Г.Н., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф., Шувалов Е.Н.* Об увеличении эмиссии нейтронов в результате ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ реакции при наносекундном разряде в среде дейтерия при использовании развитого потенциального анода // Изв. вузов. Физ. 2013. Т. 56, № 11/2. С. 20–26.
4. *Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф.* Излучение в ВУФ-области спектра бинарных смесей аргона и гелия с ксеноном при диффузном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 226–229.
5. *Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И.* РАДАН — малогабаритные сильноточные ускорители электронов импульсно-периодического действия // Приборы и техн. эксперим. 1989. № 2. С. 146–149.

D.A. Sorokin, M.I. Lomaev, V.F. Tarasenko, B.A. Nechaev, V.N. Padalko, E.N. Shuvalov. **Electrode material splashing during the high-voltage nanosecond discharge in deuterium, hydrogen, helium, and argon at low pressure.**

During the high-voltage nanosecond discharge in a gap filled with deuterium, hydrogen, helium, and argon at a pressure of 1–60 torr, using a cylinder with lateral surface made of thin tungsten wires split at the end as a potential electrode and a flat deuterated zirconium target as a material splashing of electrodes was observed. Mainly, there is material splashing on the potential electrode for both positive and negative polarities of the pulser. As the gas pressure increases the reduction of the track lengths of fluttering from electrode hot glowing drops was observed.