

04;10

Генерация пучков убегающих электронов из плазменного катода в воздушном разряде атмосферного давления

© Д.С. Мاستюгин, В.В. Осипов, В.И. Соломонов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: dddcryptic@mail.ru

В окончательной редакции 29 декабря 2008 г.

Представлены и обсуждаются результаты экспериментального исследования генерации пучков электронов в воздушном разряде атмосферного давления с плоским катодом. Разряд возбуждался импульсами напряжения отрицательной полярности амплитудой 220 кВ, длительностью на полувывоте 2 ns при фронте 0.7 ns. Электронный пучок регистрировался по свечению люминофора ZnS–CdS:Ag, установленного за анодной фольгой толщиной 20 мкм. Обнаружено увеличение яркости и повышение однородности свечения люминофора при ограничении прикатодной части воздушного промежутка диэлектрической трубкой высотой меньше длины промежутка. Делается вывод, что в объеме, ограниченном этой трубкой, образуется плазменный катод, а эмитируемые из него электроны ускоряются в открытой части воздушного промежутка. Обнаружено также, что диэлектрическая трубка уменьшает расходимость электронного пучка.

PACS: 52.59.Tb, 52.80.Tn

Эффективное убегание электронов в воздухе атмосферного давления достигается при напряженности электрического поля $E_{cr} > 10^5$ В/см [1–3]. При такой напряженности характерное время ионизации воздуха становится меньше 1 ns, поэтому E_{cr} может быть достигнуто при субнаносекундном фронте нарастания напряжения. Такие условия создаются при импульсном пробое перенапряженных воздушных промежутков. В этих условиях регистрируются пучки убегающих электронов длительностью менее 1 ns и, как правило, меньшего тока, чем в вакуумных промежутках [2,4,5].

В настоящей работе приводятся результаты исследования генерации электронного пучка в высоковольтном разряде в воздухе атмосферного давления между плоскими катодом и анодом при изменении

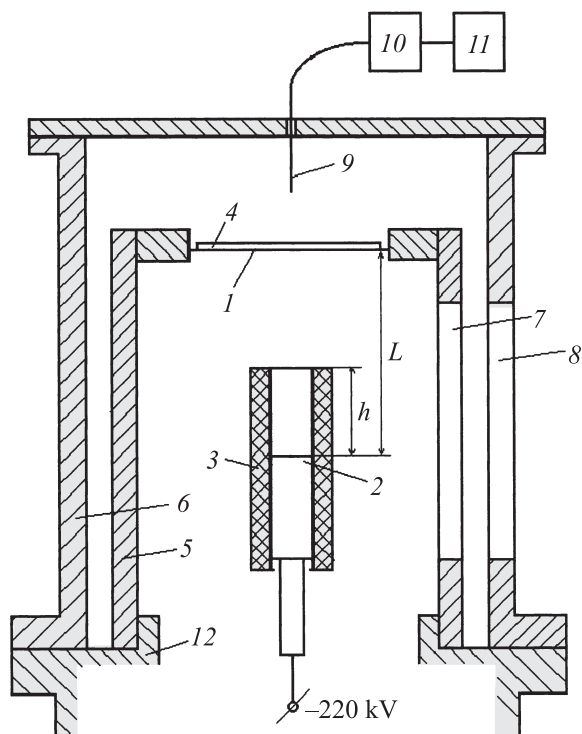


Рис. 1. Схема разрядной камеры: 1 — анод; 2 — катод; 3 — диэлектрическая трубка; 4 — люминофор; 5 — внутренний металлический стакан; 6 — внешний металлический стакан; 7, 8 — окна для фотосъемки свечения разряда; 9 — световод; 10 — фотоэлектронный умножитель; 11 — осциллограф; 12 — корпус генератора РАДАН-220.

конфигурации межэлектродного промежутка путем внесения в него диэлектрических трубок.

В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор наносекундных импульсов РАДАН-220, подобный тому, который использовался в [1]. Он формировал импульсы отрицательной полярности амплитудой 220 kV, длительностью на полувывоте 2 ns при фронте 0.7 ns. Газоразрядный промежуток (рис. 1) располагался внутри зазем-

ленного металлического стакана 5 с внутренним диаметром 80 мм, жестко соединенного с корпусом генератора РАДАН-220 12 со стороны его высоковольтного выхода. Для визуального наблюдения и фотографирования газового разряда в стакане имеется окно 7, для перекрытия которого, с целью полной экранировки разряда, использовался внешний стакан 6 с окном 8. Анодом служила алюминиевая фольга 1 толщиной 20 μm , диаметром 45 мм. Она крепилась внутри металлического стакана 5 с возможностью перемещения вдоль его оси для изменения длины межэлектродного промежутка, оптимальное значение которого составляло 24 мм. В качестве катода 2 использовались плоские основания цилиндров из графита, меди, стали (Ст. 3) и свинца диаметром d_c от 4.5 до 20.5 мм. В разрядном промежутке устанавливалась диэлектрическая трубка 3 с внутренним диаметром, равным внешнему диаметру катода. Толщина стенки трубок была 1–2 мм. Одним концом трубка плотно закреплялась на катоде с возможностью регулировки ее высоты $h < L$ в разрядном промежутке. В экспериментах были использованы трубки из кварцевого стекла, пирекса, молибденового стекла, фарфора, фторопласта, дерева, оргстекла и капролона.

Регистрация электронного тока осуществлялась по яркости свечения люминофора, облучаемого измеряемым электронным пучком. Это связано с тем, что по последним данным [4] длительность пучка убегающих электронов в воздухе атмосферного давления составляет не более 50 ps. Корректная регистрация таких коротких импульсов возможна только с помощью осциллографов с полосой пропускания от 10 GHz и выше. В данном случае для регистрации электронного тока использовался люминофор 4, представляющий собой слой кристаллофосфора ZnS–CdS:Ag размером 33 \times 33 мм и толщиной 30 μm , нанесенный на белую бумагу толщиной 27 μm . Люминофор устанавливался снаружи разрядного промежутка на анодную фольгу. Яркость свечения люминофора регистрировалась с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-100 10 и осциллографа Tektronics TDS 360 11. Световой поток от люминофора к ФЭУ передавался посредством многожильного кварцевого световода 9 длиной 80 см, приемный конец которого закреплялся на расстоянии 10 мм от люминофора. За меру яркости принималась амплитуда сигнала с ФЭУ, усредненная по десяти импульсам. Дополнительно свечение люминофора фотографировалось цифровым фотоаппаратом. Им же фотографировалось свечение самого разряда между катодом и анодом. Ток разряда регистрировался шунтом с сопротивлением 60 m Ω и осциллографом Tektronics TDS 360. В про-

межутке без диэлектрической трубки амплитуда полного тока разряда и его длительность по основанию составляли 1 кА и 5 ns. При этом свечение разряда представляло собой расходящийся от катода к аноду конус слабого фиолетового цвета, а пучок убегающих электронов с энергией единиц до сотен keV проявлялся в виде свечения люминофора, форма пятна которого и локализация стохастически менялись от импульса к импульсу. Оценки, проведенные на аппаратуре [4,5], показали, что ток пучка составлял порядка 1 А.

В воздушном промежутке, частично ограниченном диэлектрической трубкой, при том же импульсе напряжения наблюдалось существенное возрастание тока разряда. В частности, при ограничении промежутка длиной 24 mm трубкой высотой 12 mm ток разряда составил 3 кА, а его длительность возросла до 7.5 ns. При этом возрастала яркость и уменьшалась расходимость фиолетового свечения разряда в свободной части промежутка, а на внутренней поверхности трубки наблюдалось более яркое свечение разряда по поверхности. Также в этом случае повышалась стабильность свечения люминофора, регистрирующего пучок, а форма светового пятна наблюдалась в виде круга диаметром, приблизительно равным внутреннему диаметру диэлектрической трубки, с центром на оси разрядного промежутка. Кроме того, возрастала яркость свечения люминофора (рис. 2). Степень ее возрастания зависела от материала диэлектрической трубки — наибольшая яркость достигается с трубкой из кварцевого стекла. Яркость свечения люминофора возросла в 1.8, 2.4, 4.0 и 24.0 раза со стальным, медным, свинцовым и графитовым катодами соответственно.

Известно, что в гелии при атмосферном давлении получают токи пучка значительно больше, чем при том же давлении в воздухе [6]. В частности, в [7] сообщается, что в He при атмосферном давлении были получены сильноточные пучки убегающих электронов в скользящем разряде. Конфигурация эксперимента в этом случае была принципиально отличная — использовался емкостной скользящий разряд в полой толстостенной (10–42.5 mm) оргстеклянной трубке, причем разряд протекал по внутренней стенке трубки до анода, который прилегал непосредственно к ее торцу. В экспериментах же, описываемых в этой статье, скользящий разряд по поверхности диэлектрической трубки зажегся самопроизвольно и являлся вспомогательным для инициирования объемного разряда. Электроны из объемного разряда далее ускорялись в свободном пространстве между границей трубки и анодом, образуя электронный пучок.

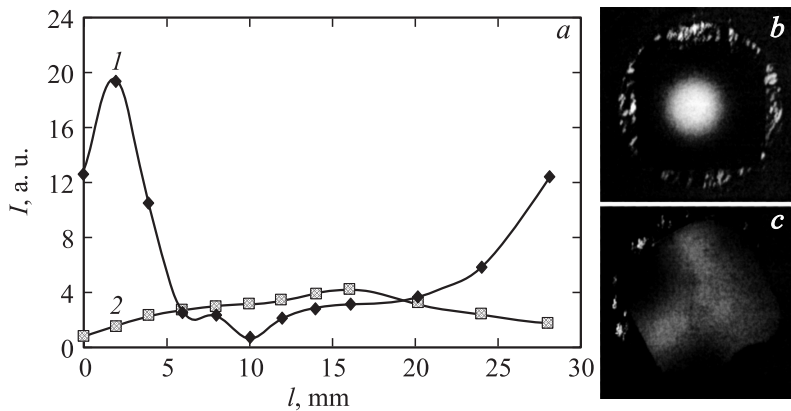


Рис. 2. *a* — зависимость яркости I свечения люминофора от расстояния l между поверхностью катода и бумажным экраном в разрядном промежутке $L = 28$ mm со стальным катодом $d_c = 10.5$ mm: 1 — с кварцевой трубкой $h = 16$ mm (одиночная точка A при $l = 0$ mm соответствует яркости свечения люминофора без экрана); 2 — без кварцевой трубки. *b, c* — свечение люминофора при ограничении разряда диэлектрической трубкой (вверху) и без него (внизу) (светлые блики кольцевого расположения на рис. 2 и 3 — отражение подсветки для фокусировки фотоаппарата на люминофоре от анодной фольги).

Были проведены эксперименты по экранировке газоразрядного промежутка черной бумагой плотностью 0.85 g/cm^3 , толщиной $13 \mu\text{m}$, пропускающей электроны с энергией меньше 25 keV . На рис. 2 приведено изменение яркости свечения люминофора при удалении бумажного экрана от стального катода на расстояние l при отсутствии (кривая 2) и наличии в промежутке кварцевой трубки (кривая 1). В случае с кварцевой трубкой диаметр экрана равнялся внутреннему диаметру трубки на промежутке от поверхности катода до ее свободного конца. На промежутке от свободного конца трубки до анода, а также в случае без диэлектрической трубки диаметр экрана составлял 45 mm.

В свободном разрядном промежутке экранировка поверхности катода приводит к почти полному исчезновению свечения люминофора, что согласуется с результатами, полученными в [4]. В разрядном промежутке, ограниченном кварцевой трубкой (кривая 1 на рис. 2), ускорение электронов происходит между свободным торцом кварце-

вой трубки и анодом. Внутри самой кварцевой трубки электроны ускоряются менее эффективно, что отражается наличием плато на кривой I . В прикатодной области электроны не ускоряются, а дрейфуют из нее в сторону анода. Об этом свидетельствует резкое снижение яркости свечения люминофора при удалении экрана от катода на расстояние $l \approx 6$ mm (рис. 2). Рост яркости при l от 0 до 2 mm (рис. 2) объясняется ускорением электронов, эмитированным непосредственно с поверхности катода, под действием катодного падения потенциала. Тем не менее вся прикатодная область до $l = 6$ mm, скорее всего, является источником плазменных электронов, которые не пропускаются бумажным экраном до определенного расстояния от поверхности катода $l = 20$ mm (рис. 2). Одним из механизмов их появления является эмиссия с катода.

Действительно, при экранировке поверхности катода (экраны помещались непосредственно на поверхности катода) черной бумагой в виде кругов с центрами на оси катода и колец с внешним диаметром, равным d_c , наблюдается изменение яркости свечения люминофора, но само свечение остается в виде круга. При экранировке кругами яркость свечения люминофора резко падает при диаметре экрана $d > d_c/2$ (рис. 3, кривая 1), а при кольцевом экранировании — возрастает при увеличении внутреннего диаметра экрана-кольца (рис. 3, кривая 2). Это указывает на то, что эмиссия электронов в основном происходит с поверхности катода, примыкающей к диэлектрической трубке. Обращает на себя внимание то, что при полной экранировке поверхности катода свечение люминофора остается достаточно ярким. Этот эффект является отличительным свойством высоковольтного разряда, частично ограниченного диэлектрической трубкой, и указывает на то, что эмиссия электронов с поверхности катода не является единственным механизмом появления плазменных электронов в прикатодном слое.

Для выявления другого механизма была проведена аксиальная экранировка объема внутри кварцевой трубки трубками из черной бумаги высотой $h_e = h$, с толщиной стенки $13 \mu\text{m}$. Оказалось, что яркость свечения люминофора уменьшается по мере увеличения диаметра экранирующей трубки $d \leq d_c$ (рис. 3, кривая 3), а само свечение проявляется в виде кольца с внутренним диаметром, приблизительно равным диаметру экрана (рис. 3). Кольцевая форма свечения люминофора сохраняется при уменьшении высоты экранирующей трубки (высота отсчитывается от поверхности катода) вплоть до $h_e = 4$ mm, а при $h_e \leq 4$ mm свечение

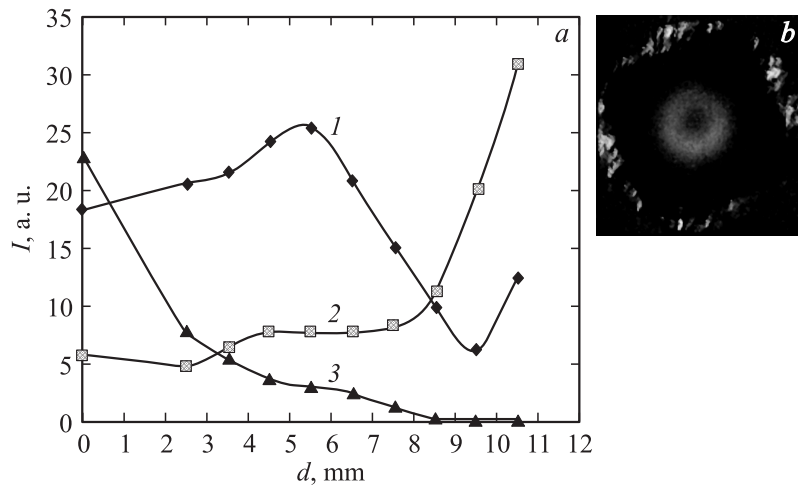


Рис. 3. *a* — изменение яркости свечения люминофора I в разряде $L = 28$ мм с кварцевой трубкой $h = 16$ мм при экранировке поверхности стального катода $d_c = 10.5$ мм кругами (1), кольцами (2) и трубками высотой 16 мм (3) из черной бумаги, d — наружный диаметр кругов и трубок и внутренний диаметр колец. *b* — свечение люминофора при аксиальной экранировке трубкой из черной бумаги $d = 6.5$ мм.

вновь принимает форму круга. Это вполне объясняется эмиссией электронов из разряда, протекающего по внутренней поверхности трубки, а также ионизацией области, ограниченной кварцевой трубкой, излучением этого разряда. Причем при экранировании бумагой фотоионизация и эмиссия электронов осуществляются также только в области между кварцевой и бумажной трубками. Во внутренний объем экранирующей трубки высотой $h > 4$ мм электроны из разряда по поверхности не проникают, фотоионизации нет и существенно ослаблена эмиссия электронов с катода. Поэтому в нем нет условий для образования плазменных электронов, что приводит к отсутствию тока ускоренных электронов из внутреннего объема экранирующей трубки и соответственно к кольцевому свечению люминофора. Полученные результаты непротиворечиво объясняются образованием в цилиндрическом объеме, ограниченном диэлектрической трубкой, плазменного

катода, из которого эмитируются электроны, ускоряемые в области между свободным концом диэлектрической трубки и анодом.

Таким образом, при ограничении прикатодной области воздушного разрядного промежутка длиной L диэлектрической трубкой высотой $h < L$ внутри нее образуется плазменный катод, концентрация электронов в котором поддерживается эмиссией электронов с твердого катода и из разряда, протекающего вдоль внутренней поверхности диэлектрической трубки, а также фотоионизацией воздуха излучением этого разряда. Эмитируемые уже из плазменного катода электроны ускоряются в электрическом поле прианодной области воздушного промежутка между внешней поверхностью плазменного катода и анодом. Образование плазменного катода сопровождается стабилизацией параметров пучка убегающих электронов, значительным снижением его расходимости, а также увеличением яркости свечения люминофора, а значит, и увеличением тока пучка убегающих электронов. Полученный пучок возможно использовать для накачки газового лазера по схеме, аналогичной [8].

Работа выполнена при поддержке РФФИ проекта № 08-02-00982а и 08-02-99065 Р-ОФИ, а также в рамках проекта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере № 5255р/7650 по программе УМНИК.

Список литературы

- [1] *Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И.* // УФН. 2004. Т. 174 (9). С. 953.
- [2] *Бабич Л.П.* // УФН. 2005. Т. 175 (10). С. 1069.
- [3] *Maltsev A.N.* // IEEE Transactions on plasma science. 2006. V. 34 (4). P. 118.
- [4] *Месяц Г.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 4. С. 71.
- [5] *Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 35.
- [6] *Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 16. С. 45.
- [7] *Дашук П.Н., Кулаков С.Л.* // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 21. С. 1315.
- [8] *Дашук П.Н., Кулаков С.Л.* // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 21. С. 1307.