

ДИФФУЗНЫЕ РАЗРЯДЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ В SF₆, АЗОТЕ И ВОЗДУХЕ ЗА СЧЕТ ПРЕДЫОНИЗАЦИИ УБЕГАЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ¹

Проведены исследования объёмного (диффузного) разряда, инициируемого пучком электронов лавин, в SF₆, азоте и воздухе. На промежуток, образованный трубчатым катодом и плоским анодом подавались импульсы напряжения от генератора РАДАН-220. Измерения с субнаносекундным временным разрешением амплитудно-временных характеристик излучения и диффузного разряда показали, что пробой промежутка при обеих полярностях электрода с малым радиусом кривизны происходит за счет двух волн ионизации, первая из которых инициируется убегающими электронами. При фронте импульса напряжения ~500 пс с субнаносекундной точностью получены данные об ультрафиолетовом излучении диффузного разряда из различных областей промежутка.

Ключевые слова: объёмный разряд, инициируемый пучком электронов лавин, ОРИПЭЛ, высокое давление, SF₆, азот, воздух.

Изучению разрядов в газах повышенного давления уделялось и уделяется большое внимание. Это связано со сложностью физических процессов, происходящих в промежутке и на электродах, а также с широким применением различных типов разрядов в технике и технологиях. В последние годы существенно повысилось внимание к изучению диффузных разрядов атмосферного давления, которые формируются при повышенных давлениях за счет убегающих электронов (УЭ) и рентгеновского излучения (РИ), см. коллективную монографию [1] и ссылки в ней. Убегающими электронами (УЭ) обычно называют электроны с повышенной энергией, которые генерируются при газовых разрядах в высоком электрическом поле. История работ в этом направлении начинается с предложения профессора Вильсона о возможности генерации электронов с повышенной энергией при атмосферных разрядах, которое было опубликовано в 1924 году. Ссылки на все первые работы по генерации убегающих электронов и формированию диффузных разрядов в неоднородном электрическом поле приведены в [1]. Однако только спустя 42 года после первой работы присутствие УЭ при разряде в гелии атмосферного давления было подтверждено экспериментально по рентгеновскому излучению (РИ) из промежутка. Диффузные разряды, формируемые без применения дополнительного источника для предыонизации промежутка при атмосферном давлении гелия и воздуха, были впервые описаны в 60-тых годах прошлого столетия. В последующие годы диффузные разряды, формируемые в неоднородном электрическом поле без дополнительного источника для предыонизации промежутка и сопровождающиеся РИ и УЭ, исследовались во многих работах (см. коллективную монографию [1] и ссылки в ней). Однако динамика формирования таких разрядов остается слабо изученной, особенно это относится к разрядам, формируемым в плотных газах при подаче на промежуток импульсов напряжения с субнаносекундным фронтом. Это обусловлено сложностью процессов, протекающих на электродах и в промежутке, а также высокой скоростью ионизации при большой напряженности электрического поля у электрода с малым радиусом кривизны (~10⁷ В/см) и в промежутке.

Цель данной работы - провести исследования динамики ионизационных процессов в азоте, воздухе и SF₆ при диффузном пробое, инициируемом убегающими электронами в неоднородном электрическом поле импульсами напряжения с субнаносекундным фронтом. При выполнении данной работы были использованы современные осциллографы с пикосекундным временным разрешением, специально разработанные датчики для регистрации тока через промежуток и тока сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) за анодной фольгой, а также фотодиод с субнаносекундным временным разрешением.

Для исследования субнаносекундного пробоя в азоте, воздухе, SF₆ и смеси SF₆ с азотом применялась установка, состоящая из генератора РАДАН-220 и разрядной камеры. Разрядная камера, в которой устанавливались высоковольтный электрод с малым радиусом кривизны и плоский электрод, а также схема эксперимента показаны на рис. 1. Фотодиод PD025 (1) и экран с щелью (2) были установлены на подвижном столике, благодаря чему обеспечивалась регистрация

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-58-53031_ГФЕН_а.

излучения из зон, расположенных вдоль оси разрядного промежутка с пространственным разрешением ~ 1 мм. В каждой зоне регистрировалось 100 импульсов излучения и 100 соответствующих импульсов напряжения и тока разряда, затем производилось усреднение. Поскольку импульсы напряжения и тока разряда не зависели от того, из какой зоны регистрировалось излучение, то для них усреднение производилось за 1400 импульсов.

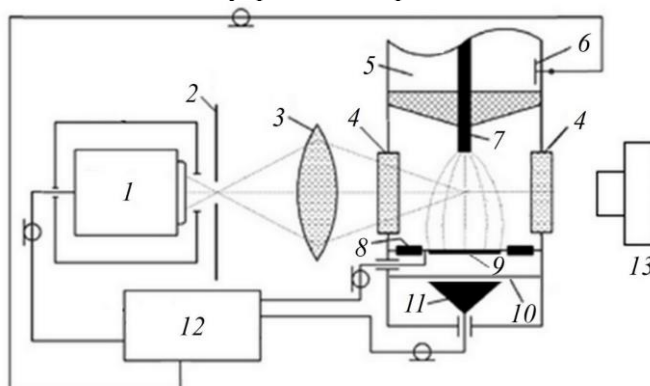


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – фотоприемник PD025 в металлическом экране, 2 – экран с щелью (1 мм), 3 – линза, 4 – боковые окна, 5 – передающая линия генератора РАДАН-220, 6 – емкостной делитель напряжения, 7 – высоковольтный электрод, 8 – токовый шунт, 9 – заземленный сетчатый электрод, 10 – фольга, 11 – коллектор, 12 – осциллограф, 13 – фотоаппарат Sony A100 или спектрометр.

Интегральное излучение из промежутка фотографировалось цифровым фотоаппаратом Sony A100. Спектры излучения разряда регистрировались с помощью спектрометров HR4000 (Ocean Optics B.V., рабочая область $\Delta\lambda = 200 - 305$ нм) и EPP-2000C (Stellar-Net Inc., рабочая область $\Delta\lambda = 200 - 850$ нм).

На основе полученных в работе и известных из литературы данных (см. коллективную монографию [1] и ссылки в ней), о формировании объемного разряда, инициируемого пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ), была установлена следующая динамика основных ионизационных процессов в промежутке, который заполнялся SF_6 , азотом или воздухом. Пробой газов повышенного давления при субнаносекундном и наносекундном фронте импульса напряжения в геометрии промежутка острие-плоскость начинается с автоэлектронной эмиссии с острья-катода или за счет эффекта автоионизации молекул газа в области около острья-анода. Наблюдаемая задержка (~ 30 пс) в формировании волны ионизации при положительной полярности импульса напряжения, по-видимому, обусловлена различиями в механизме эмиссии электронов (автоэлектронная эмиссия и автоионизация). Так как критические напряженности электрического поля для этих механизмов эмиссии электронов больше, чем критическое поле для убегания электронов, то у электрода-острия часть электронов переходит в режим убегания. Эти быстрые электроны осуществляют начальную предьонизацию промежутка у острья. Из начальных электронов, появившихся в результате ионизации газа быстрыми (убегаящими) электронами, а также в результате автоионизации, развиваются лавины электронов, головки которых перекрываются. Соответственно, у электрода с малым радиусом кривизны (острия) при обеих полярностях импульса напряжения формируется плотная диффузная плазма. Концентрация электронов и ионов в этой плазме достаточна для вытеснения из нее электрического поля, как и в случае стримера. Фронт плотной диффузной плазмы движется к плоскому электроду за счет усиления электрического поля перед ним и появления начальных электронов за счет предьонизации газа УЭ, а также рентгеновским и ВУФ излучением. Другими словами, от электрода с малым радиусом кривизны к плоскому электроду в начале пробоя распространяется облако плотной плазмы, поперечные размеры которого существенно больше, чем у отдельного стримера. При этом, ионы из-за их большой массы практически остаются на месте, а движение фронта волны ионизации к плоскому электроду обеспечивается за счет размножения электронов в узком слое с усиленным электрическим полем. Однако механизм предьонизации газа перед фронтом волны ионизации при положительной и отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны отличается.

При отрицательной полярности острья на границе плотной плазмы, как и в головке электронной лавины, а также анодонаправленного стримера, образуется область с избыточным

отрицательным зарядом. Однако при этом имеется существенное отличие поперечных размеров плазмы в волне ионизации при формировании ОРИПЭЛ и плазмы в электронной лавине. Это различие приводит к формированию более высокого электрического поля перед фронтом волны ионизации. Соответственно, в волне ионизации концентрация электронов больше, чем в лавине, а также существенно выше скорость продвижения к аноду ее фронта. При этом, часть электронов на границе области с избыточным отрицательным зарядом ускоряются как за счет приложенного электрического поля, так и за счет отрицательного заряда облака электронов на границе плотной плазмы. По мере продвижения фронта волны ионизации по промежутку в области усиленного электрического также реализуются условия для генерации УЭ за счет поляриационного самоускорения. При этом число убегающих электронов, движущихся от границы плотной плазмы (от фронта волны ионизации) в процессе движения фронта волны ионизации увеличивается, что в конечном итоге приводит к увеличению амплитуды пучка УЭ за анодом из фольги. Также при этом увеличивается энергия электронов. Таким образом, движение фронта первой волны ионизации обеспечивается как за счет УЭ, которые осуществляют предьонизацию газа перед ее фронтом, так и за счет высокого электрического поля перед фронтом волны ионизации. Из создаваемых убегающими электронами вследствие ионизации газа начальных электронов развиваются новые электронные лавины, головки которых также перекрываются. При этом, наиболее быстро формирование плотной плазмы происходит в области около фронта волны ионизации, в которой достигается наибольшее усиление электрического поля. Ток через промежуток до появления в нем плотной плазмы, которая вытесняет электрическое поле является емкостным и обусловлен зарядкой емкости «холодного» газового диода. Его величина при субнаносекундном фронте импульса напряжения генератора может достигать в зависимости от конструкции катода и амплитуды импульса напряжения десятков-сотен ампер. После формирования плотной плазмы у катода с малым радиусом кривизны ток через промежуток начинает быстро увеличиваться и за десятки-сотни пикосекунд достигает сотен ампер - единиц килоампер. Увеличение тока через промежуток обеспечивается за счет зарядки сжимающегося конденсатора между фронтом плотной плазмы и анодом. При этом основным механизмом эмиссии электронов с катода становится взрывная эмиссия электронов. Доказательством этого механизма является появление на катоде за время сотни пикосекунд ярких пятен и эрозия острых кромок катода при субнаносекундной длительности импульса напряжения. Далее по мере продвижения фронта волны ионизации происходит замыкание промежутка плотной плазмой волны ионизации.

Экспериментально было установлено, что скорость фронта волны ионизации увеличивалась по мере ее продвижения. При достижении пучком электронов анода, суммарный ток через промежуток уменьшается, а после ухода УЭ в анод снова увеличивается. По свечению плазмы в различных участках межэлектродного зазора и последующим анализом было установлено, что после того, как фронт первой волны ионизации, направленной от электрода с малым радиусом кривизны к плоскому электроду, пересек промежуток, формируется вторая волна ионизации, направленная от плоского электрода к электроду с малым радиусом кривизны. Ток через промежуток при движении второй волны ионизации также обеспечивается взрывной эмиссией электронов с катода с малым радиусом кривизны.

При положительной полярности потенциального электрода с малым радиусом кривизны на границе плотной плазмы со стороны катода находятся в основном положительные ионы и имеется область с избыточным положительным зарядом. Электроны около границы этой области ускоряются как за счет приложенного электрического поля, так и за счет положительного заряда облака ионов на границе плотной плазмы. До образования плазмы, как мы уже отмечали, первые электроны у острия-анода появляются за автоионизации. Часть этих электронов может переходить в режим убегания и при торможении на аноде генерирует РИ. Рентгеновское излучение распространяется в полный телесный угол, в том числе в направлении катода и осуществляет начальную предьонизацию промежутка. Из начальных электронов, созданных за счет рентгеновского излучения из анода, продолжают развиваться электронные лавины, головки которых перекрываются, и фронт волны ионизации продвигается к катоду. Часть электронов перед фронтом волны ионизации успевает набрать энергию в единицы-десятки кэВ и при взаимодействии с газом генерируется РИ. Как известно, эффективность генерации тормозного излучения падает с уменьшением энергии электронов и атомного номера мишени. Однако эффективность генерации характеристического рентгеновского излучения в легких газах при

энергии электронов в единицы-десятки кэВ существенно больше, чем тормозного излучения [2]. Перемыкание промежутка при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны также происходит за счет волны ионизации, но в создании начальных электронов важную роль играют не только УЭ, но и РИ. Протекание тока через промежуток при движении волны ионизации и аноде с малым радиусом кривизны также обеспечивается за счет зарядки сжимающегося конденсатора между фронтом плотной плазмы и плоским катодом и за счет тока проводимости в плотной плазме. Однако после прихода фронта плотной плазмы на катод сжимающийся конденсатор замыкается и необходим эффективный механизм генерации электронов с катода. Мы считаем, что электроны поставляются в промежуток с плоского катода после прихода катодонаправленной волны ионизации в основном за счет взрывной эмиссии электронов. Взрывоэмиссионные центры (яркие пятна) хорошо видны на фотографиях разряда при высоких давлениях. Нарастание полного тока проводимости при положительной полярности анода острия в широком диапазоне экспериментальных условий наступает с большей задержкой, чем при отрицательной полярности острия. Из проведенных исследований следует, что ОРИПЭЛ формируется при обеих полярностях электрода с малым радиусом кривизны. Однако при отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны диффузный разряд формируется при более высоких удельных энерговкладах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tarasenko V. F., (Editor). // Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges. New York: Nova Science Publishers, Inc. - 2014.
2. Козырев А.В., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Шутько Ю.В. // Письма в ЖТФ. - 2011. - Т. 37. - В. 22. - С. 26–33.

* Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

** Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., зав. лаб., профессор;

Белоplotов Дмитрий Викторович, мл. науч. сотр., аспирант;

Ломаев Михаил Иванович, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр.

V.F. TARASENKO***, D.V. BELOPLOTOV***, M.I. LOMAEV***

RUNAWAY ELECTRONS PREIONIZED DIFFUSE DISCHARGES IN SF₆, NITROGEN AND AIR

The present paper summarizes research results on runaway electron preionized diffuse discharges (REP diffuse discharge or shortly REP DD) in single pulsed mode. The REP DDs are initiated high voltage pulses due to the generation of runaway electrons and x-ray in an inhomogeneous electric field. It is shown that this type of discharge is formed both at negative and positive polarity of electrodes of small curvature radius. Either a cathode or an anode, or both can have a small curvature radius. During the formation of a REP DD, SAEB and X-rays are detected. The role of characteristic radiation in the formation of a REP DD is discussed. It is shown that the SAEBs are generated in the first breakdown phase when the gap is bridged by an ionization wave.

Keywords: runaway electrons preionized diffuse discharge, REP DD, high pressure, SF₆, nitrogen, air.

REFERENCES

1. Tarasenko V. F. (Editor). Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges. New York: Nova Science Publishers, Inc. 2014, 598 p.
2. Kozыrev A. V., Tarasenko V. F., Baksht E. Kh., Shut'ko Y. V. Soft X-ray generation and its role in breakdown of air gap at elevated pressures. *Technical Physics Letters*, 2011, vol. 37, no. 11, pp. 1054-1057.

* Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk.

** National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia, Russia,

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Tarasenko Victor Fedotovitch, Dr. of Sc., Head of the Laboratory, Professor;

Beloplotov Dmitry Victorovich, Junior Researcher;

Lomaev Mikhail Ivanovich, Dr. of Sc., Senior Researcher.