

УДК 537.523.9

В.Ф. ТАРАСЕНКО *****, М.В. ЕРОФЕЕВ* ****, М.И. ЛОМАЕВ* ****, М.А. ШУЛЕПОВ****ДИФФУЗНЫЕ РАЗРЯДЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ ЗА СЧЕТ ПРЕДЫОНИЗАЦИИ
УБЕГАЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ, И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ¹**

Проведен анализ результатов исследований объемного (диффузного) разряда, инициируемого пучком электронов лавин, в азоте, воздухе и SF₆. Представлены результаты исследований воздействия диффузного разряда, формируемого в неоднородном электрическом поле в воздухе и азоте атмосферного давления, на поверхность меди и нержавеющей стали.

Ключевые слова: объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин, ОРИПЭЛ, атмосферное давление, модификация поверхностного слоя, очистка поверхности.

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. работу [1] и ссылки в ней). При формировании таких разрядов на плоский анод воздействуют плотная плазма, ударная волна, сверхкороткий лавинный электронный пучок, а также УФ- и ВУФ-излучение [1–3]. За счет торможения быстрых электронов на аноде и газе также генерируется РИ. Для получения значительного числа электронов с повышенной энергией (достаточного для формирования диффузного разряда) при наносекундных разрядах используют промежутки, имеющие один или оба электрода с малым радиусом кривизны. В работе [4] было предложено называть данный режим объемного (диффузного) разряда в неоднородном электрическом поле ОРИПЭЛ – объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин.

Цель данной работы – проанализировать динамику ионизационных процессов в азоте, воздухе и SF₆ при диффузном пробое, инициируемом убегающими электронами в неоднородном электрическом поле импульсами напряжения с субнаносекундным фронтом, а также исследовать воздействие плазмы ОРИПЭЛ на поверхность меди и нержавеющей стали при разряде в воздухе и азоте атмосферного давления в различных режимах разряда.

Для исследования субнаносекундного пробоя в азоте, воздухе, SF₆ и смеси SF₆ с азотом, а также воздействия ОРИПЭЛ на образцы из меди и нержавеющей стали применялся генератор РА-ДАН–220 (в ряде экспериментов РАДАН–303) и разрядная камера, в которой устанавливались потенциальный электрод с малым радиусом кривизны и плоский электрод, соединенный с корпусом камеры. Подробно установка описана в работе [2].

На основе полученных в работе и известных из литературы данных [1] о формировании объемного разряда, инициируемого пучком электронов лавин, была установлена следующая динамика основных ионизационных процессов в промежутке. Пробой газов повышенного давления при субнаносекундном и наносекундном фронте импульса напряжения в геометрии промежутка острие – плоскость начинается с автоэлектронной эмиссии с острия-катода или за счет эффекта автоионизации молекул газа в области около острия-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 предыонизацию промежутка у острия. Из начальных электронов, появившихся в результате ионизации газа быстрыми (убегающими) электронами, а также в результате автоионизации развиваются лавины электронов, головки которых перекрываются. Соответственно у электрода с малым радиу-

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

сом 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 предыонизации 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 предыонизации газа перед фронтом волны ионизации при положительной и отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны отличается.

При отрицательной полярности острия 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 поляризационного 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 предыонизацию 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 острья-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 предыонизацию 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 килоэлектронвольт 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 килоэлектронвольт существенно больше, чем тормозного излучения [5]. 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 острья в широком диапазоне экспериментальных условий наступает с большей задержкой, чем при отрицательной полярности острья. 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 энергозатратах. Поэтому в экспериментах по модификации и очистке поверхности меди и нержавеющей стали использовались импульсы напряжения отрицательной полярности.

Образцы при этом размещались на плоском аноде разрядной камеры, показанной на рис. 1.

Полученные результаты по очистке поверхности меди и её окислению представлены на рис. 2. На рис. 2, *а* показаны изменения распределения концентраций углерода, а на рис. 2, *б* – кислорода в поверхностном слое меди при обработке ОРИПЭЛ, формируемом в воздухе атмосферного давления на установках с генераторами РАДАН-220 и РАДАН-303. Из рис. 2, *а* видно, что в поверхностном слое исходного образца, даже после протирки этиловым спиртом, концентрация углерода достигает ~ 70 % (кривая 4.С). За счет обработки в ультразвуковой ванне в течение 20 мин концентрация углерода уменьшается примерно до 37 % (кривая 3.С). Обработка меди ОРИПЭЛ без очистки в ультразвуковой ванне за 300 имп. дает более качественную очистку поверхности (кривая 2.С). Наилучший результат был получен при начальной обработке образца в ультразвуковой ванне, а затем в ОРИПЭЛ (кривая 1.С).

Обработка ОРИПЭЛ в воздухе атмосферного давления приводит к окислению поверхности меди (рис. 2, *б*). Увеличение глубины оксидного слоя при обработке ОРИПЭЛ с генератором РАДАН-303 связано с большей длительностью импульса напряжения (кривая 4.О).

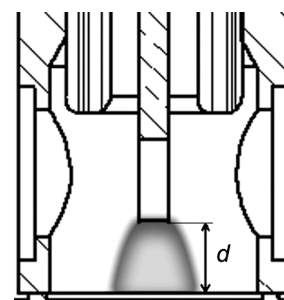


Рис. 1. Конструкция разрядной камеры: d – межэлектродный промежуток между трубочатым потенциальным катодом (сверху) и плоским анодом (внизу)

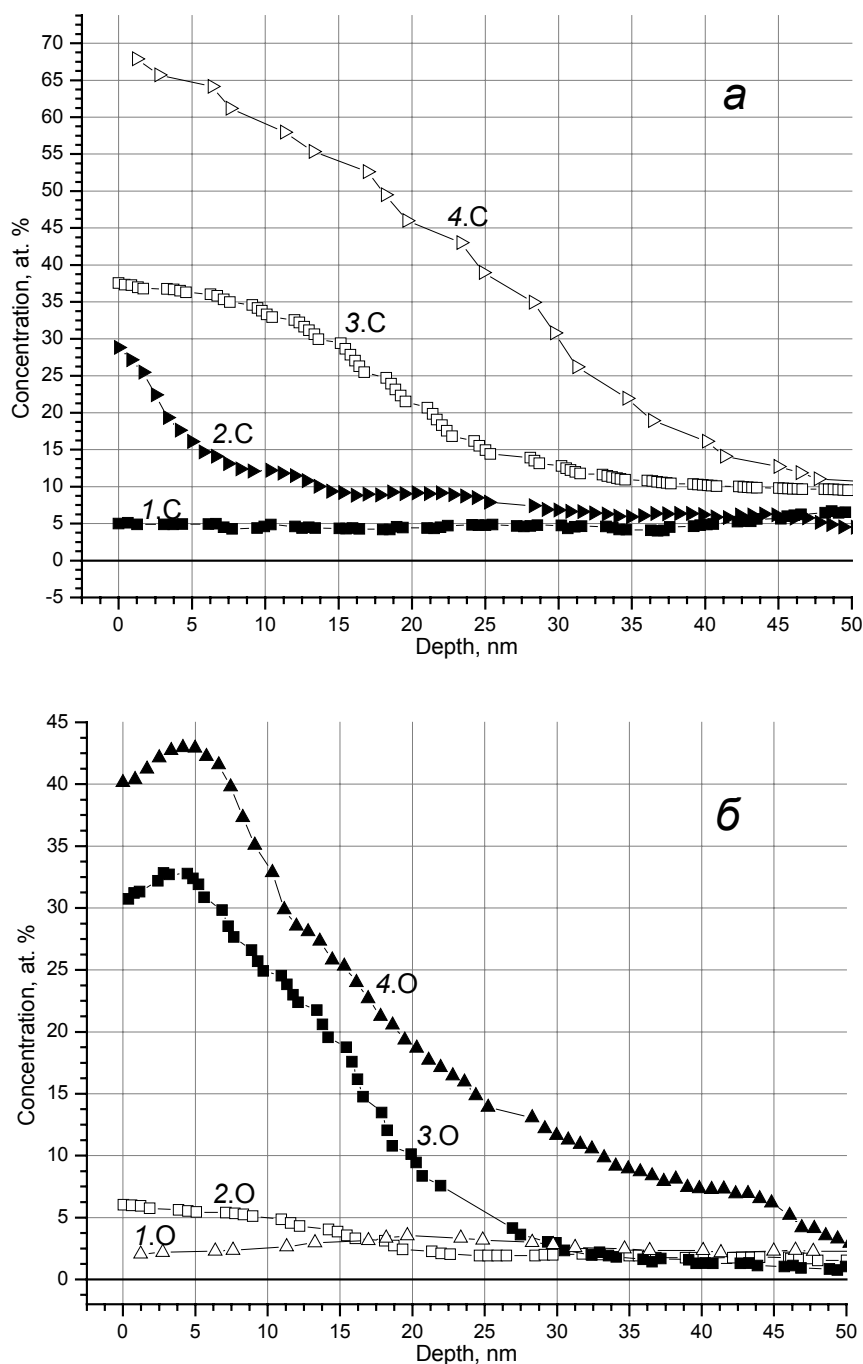


Рис. 2. Изменение концентраций основных элементов в поверхностных слоях меди под действием ОРИПЭЛ: *а* – очистка поверхности меди от углерода за 1200 (кр. 1.С) и 300 имп. (кр. 2.С) на установке с генератором РАДАН-220, а также за счет обработки в ультразвуковой ванне (3.С); *б* – окислирование поверхности меди за 300 имп. на установке с генератором РАДАН-220 (кр. 3.О) и РАДАН-303 (кр. 4.О). Исходный образец для обработанных образцов (кр. 1.С), (кр. 2.С), (кр. 3.С) обозначен как кр. 4.С, а для образцов кр. 3.О и кр. 4.О исходные образцы обозначены как кр. 1.О и кр. 2.О соответственно. Межэлектродный зазор при обработке ОРИПЭЛ образцов (кр. 1.С), (кр. 2.С) и (кр. 3.О) равнялся 18 мм, а кр. 4.О 11 мм

Распределения концентраций углерода и изменение распределения концентраций кислорода в поверхностном слое нержавеющей стали при обработке ОРИПЭЛ, формируемом в воздухе атмосферного давления, подобно полученному для анода из меди.

Результаты исследований воздействия объемного разряда, инициируемого пучком электронов лавин, показали, что при атмосферном давлении воздуха и азота происходит очистка поверхностей меди и нержавеющей стали от углерода, а также их окислирование (в азоте за счет примесей ки-

слорода). Причем подобные результаты были получены как при удельных мощностях энергозатрат ~ 100 МВт/см³ и частоте следования импульсов 1 Гц, так и при удельных мощностях энергозатрат ~ 10 МВт/см³ и частоте следования импульсов 2 кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges / ed. V.F. Tarasenko. – New York: Nova Science Publ., Inc., 2014.
2. Vaksht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., et al. // J. Phys. D.: Appl. Phys. – 2009. – V. 42. – P. 185201.
3. Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Коротаев А.Г. и др. // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1. – № 3. – С. 333–336.
4. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. – 2003. – Т. 45. – № 3. – С. 94–95.
5. 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

Поступила в редакцию 03.08.15.

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

***Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

г. Томск, Россия

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

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией;
Ерофеев Михаил Владимирович, к.ф.-м.н., науч. сотр.;
Ломаев Михаил Иванович, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Шулепов Михаил Александрович, к.ф.-м.н., мл. науч. сотр.

V.F. TARASENKO, **, ***, M.V. EROFEEV*, ***, M.I. LOMAEV*, **, M.A. SHULEPOV**

RUNAWAY ELECTRONS PREIONIZED DIFFUSE DISCHARGES AND THEIR APPLICATION

The electron beams and diffuse (volume) discharges in gases have a wide application in various fields of science and technology. There are different ways and devices to obtain pulsed diffuse discharges at atmospheric pressure and higher; most of them use additional sources of short-wave radiation, including X-rays, electron beams, and radioactive radiation. 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. In addition, this paper presents the results of an experimental investigation of the modified near-surface layers of a copper and stainless steel plates upon the action of plasma of a REP DD in air and nitrogen at atmospheric pressure. At the REP DD, the anode is influenced by the plasma of a dense nanosecond discharge with the specific input power up to hundreds of megawatt per a cubic centimeter, by the supershort avalanches electron beam (SAEB), shock wave and optical radiation from discharge plasma of various spectral ranges, including UV and VUV.

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. The formation of a REP DD does occur at increased pressures: in nitrogen at up to 5 atm. 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.

It is established that the surface layer of the discharge-treated the copper and stainless steel plates is cleaned from carbon contaminations. The oxygen penetration up to a depth of about 50 nm was obtained. It has been found that the treatment of a copper and steel surface by this type of discharge increases the hardness of the surface layer of copper and steel. This allows forecasting the REP DD application for modification and cleaning of metal surfaces in different technological processes as well as for the dielectric surface modification and cleaning at a definite anode design.

Keywords: runaway electrons preionized diffuse discharge, REP DD, atmospheric pressure, modified near-surface layers, cleaning surfaces.

REFERENCES

1. Tarasenko V. F. (ed.). Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges. New York, Nova Science Publ., Inc. 2014, 598 p.
2. Baksht E. H., Burachenko A. G., Kostyrya I. D., Lomaev M. I., Rybka D. V., Shulepov M. A., Tarasenko V. F. (2009). Runaway-electron-preionized diffuse discharge at atmospheric pressure and its application. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(18), 185201.
3. Voitsekhovskii A.V., Kokhanenko A.P., Grigoryev D.V., Korotaev A.G., Peters A.S., Tarasenko V.F., Shulepov M.A. (2013). Effect of the nanosecond volume gas discharge in air, argon and nitrogen on the electro-physical properties of the narrow band CdHgTe semiconductors. *Journal of Applied Chemistry*, 1(3), 333–336. (in Russian)
4. Tarasenko V. F., Orlovskii V. M., Shunailov S. A. (2003). Forming of an electron beam and a volume discharge in air at atmospheric pressure. *Russian Physics Journal*, 46(3), 325–327.
5. Kozyrev A. V., Tarasenko V. F., Baksht E. Kh., Shut'ko Y. V. (2011). Soft X-ray generation and its role in breakdown of air gap at elevated pressures. *Technical Physics Letters*, 37(11), 1054–1057.