

Условия равномерного воздействия на анод плазмы импульсного диффузного разряда, формируемого за счет убегающих электронов

© М.В. Ерофеев,^{1,2} Е.Х. Бакшт,¹ А.Г. Бураченко,¹ В.Ф. Тарасенко^{1,2}

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: mve@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 29 января 2015 г.)

Исследована пространственная структура объемного (диффузного) разряда в сильно неоднородном электрическом поле при наносекундных длительностях импульсов напряжения и атмосферном давлении воздуха, а также воздействие плазмы данного разряда на поверхность плоского алюминиевого анода. Показано, что диффузный разряд при наносекундной длительности импульса напряжения генератора позволяет в воздухе атмосферного давления проводить однородную обработку поверхности анода в отличие от искрового разряда, приводящего к ухудшению рельефа поверхности за счет образования на ней микрократеров и зон с измененными свойствами.

Введение

Благодаря созданию высоковольтных наносекундных генераторов, способных работать как в режиме однократных импульсов, так и с частотами повторения импульсов напряжения до нескольких килогерц в последние годы достигнут значительный прогресс в исследованиях и применениях объемных (диффузных) разрядов, формируемых при атмосферном давлении различных газов в неоднородном электрическом поле за счет генерации убегающих электронов [1–3]. Ввиду того, что в объемных разрядах, инициированных пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ) достигаются высокие удельные мощности возбуждения плазмы (до сотен MW/cm^3 [4]), а также концентрации электронов и ионов (в азоте $\sim 10^{14} \text{cm}^{-3}$ [5]), образованных в межэлектродном промежутке в результате протекания тока разряда, становится актуальным исследование возможности практического применения ОРИПЭЛ в технологиях обработки и модификации поверхности металлов и диэлектриков. В связи с этим исследование пространственной структуры разряда, и как следствие, однородности его воздействия на поверхность обрабатываемого материала являются наиболее важными с практической точки зрения.

Ранее в работах [6,7] было показано, что при импульсных разрядах с длительностью фронта импульса напряжения десятки ns в однородном электрическом поле напряженностью несколько десятков kV/cm , недостаточном для образования стримера, и миллиметровых межэлектродных промежутках при атмосферном давлении лавины развиваются до достижения ими определенного критического диаметра, после чего происходит распад лавины на небольшое число вторичных лавин. Двигаясь к аноду, эти вторичные лавины распадаются аналогичным образом до тех пор, пока не достигнут анода. Достигшие анода токовые микроканалы, образовавшиеся из лавин, оставляют на его поверхности эрозионные

отпечатки, диаметр которых согласуется с диаметрами каналов и пропорционален величине протекающего в них тока. В работе [7] установлено, что отпечатки на поверхности анода, оставляемые проводящими каналами тока с диаметром $0.3\text{--}0.6 \text{mm}$ и амплитудой $100\text{--}500 \text{A}$, представляют собой совокупность ~ 100 микроканалов диаметром $10\text{--}30 \mu\text{m}$. Аналогичная структура отпечатков токовых каналов наносекундного искрового разряда в воздухе атмосферного давления в однородном и в резко неоднородном электрических полях на поверхности анода из висмута и алюминиевой фольги толщиной $10 \mu\text{m}$ наблюдалась и в искровом разряде [8]: „Искровой канал диаметром $0.1\text{--}0.4 \text{mm}$ представлял собой совокупность большого числа микроканалов диаметром $\Delta_{\text{mic}} = 5\text{--}10 \mu\text{m}$. Амплитуда тока в искре $1.5\text{--}3 \text{kA}$ “. Отпечаток на поверхности анода, оставленный искрой с такой внутренней микроструктурой, представляет собой скопление микрократеров количеством $600\text{--}900$ штук, причем в центральной части искры возможно слияние отдельных микроканалов, образующих кратеры диаметром $20\text{--}30 \mu\text{m}$. Микроструктура разряда, состоящая из каналов микронного диаметра, объясняется „отсутствием перекрытия головок микроканалов за счет достаточно быстрого пересечения промежутка длиной $3\text{--}5 \text{mm}$ и, с другой стороны, отсутствием радиального ионизационного расширения микроканалов в результате ослабления поля в скоплении из-за суперпозиции полей большого количества микроканалов“ [8].

В работе [9] объемный разряд, формируемый в воздухе атмосферного давления в геометрии „острие–плоскость“ импульсами напряжения амплитудой 240kV с длительностью 180ns и временем нарастания 14ns , также оставлял на аноде автографы аналогичной микроструктуры, привязывающиеся к неоднородностям на его поверхности. Предложен следующий механизм развития микроструктуры разряда: „при приближении к аноду плазменного образования, распространяющегося

от катода в фазе перемикаания разрядного промежутка, происходит локальное усиление электрического поля в зазоре между головкой плазменного образования и анодом. Вблизи поверхности анода в условиях ионизации быстрыми электронами и фотоионизации, сопровождающими продвижение головки разрядного канала, формируется плазменный слой, неустойчивость поверхности которого приводит к развитию микроканалов" [9]. С другой стороны, в работах [10,11] сообщалось о равномерной обработке поверхности плоского анода при воздействии ОРИПЭЛ. Отметим, что в работах [10,11] использовались импульсы напряжения наносекундной длительности.

Цель настоящей работы — исследовать с помощью высокоскоростной CCD-камеры формирование ОРИПЭЛ и прорастающих искровых каналов, а также характер воздействия плазмы объемного и искрового разрядов на плоскую поверхность анода из алюминия при использовании импульсов напряжения наносекундной длительности.

1. Экспериментальная аппаратура и методика

В работе применялись три экспериментальные установки, состоящие из высоковольтных наносекундных генераторов FPG-10, FPG-60 [12] и SLEP-150 [13], разрядной камеры и системы регистрации тока и напряжения, с разрешающей способностью не менее 1 ns.

На установке №1 для исследования коронного разряда использовался генератор FPG-10 с амплитудой импульсов напряжения в передающей линии до 12.5 kV. Данный генератор при работе на согласованную нагрузку обеспечивал длительность импульса напряжения на полувысоте ~ 1 ns с длительностью фронта ~ 0.2 ns. Генератор подключался к газоразрядному промежутку кабелем длиной 1.3 м, имеющем волновое сопротивление 50 Ω . Разряд формировался в воздухе атмосферного давления между двумя электродами, представляющими собой медицинские иглы из нержавеющей стали диаметром 0.5 mm. Зазор между иглами составлял 4 mm. Также исследования проводились при диффузном разряде между иглой и плоскостью из алюминиевой фольги при межэлектродном зазоре 2 mm. Частота следования импульсов напряжения достигала 1 kHz.

На установке №2 разряд формировался в газоразрядной камере (рис. 1) между плоским анодом 1 и катодом 2 с малым радиусом кривизны, на который от генератора FPG-60 подавались высоковольтные импульсы напряжения отрицательной полярности.

Исследования на этой установке обычно проводились при частоте следования импульсов 400 Hz. В данных экспериментах амплитуда падающей волны напряжения составляла 10–20 kV с длительностью импульса 4–5 ns на полувысоте и длительностью переднего фронта 2–3 ns. На рис. 2 показана осциллограмма тока разряда и

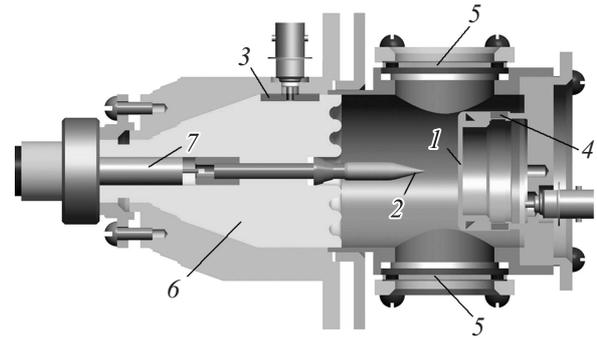


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры: 1 — плоский анод, 2 — острый катод, 3 — емкостной делитель напряжения, 4 — токовый шунт, 5 — кварцевые окна, 6 — изолятор, 7 — высоковольтный кабель.

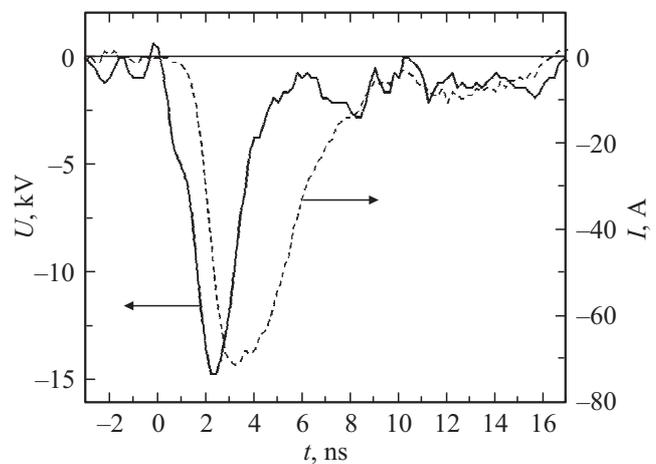


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока при ОРИПЭЛ, формируемом с генератором FPG-60.

напряжения на промежутке при атмосферном давлении воздуха. Межэлектродный зазор составлял 2 mm. В этих условиях удельная мощность энерговклада достигала 10 MW/cm^3 .

На установке №3 объемный разряд формировался генератором SLEP-150 в воздухе атмосферного давления. Генератор имел амплитуду падающей волны в передающей линии ~ 150 kV, фронт нарастания импульса напряжения составлял 250 ps, а длительность импульса на полувысоте ~ 1 ns. Разрядный промежуток был образован трубчатым катодом диаметром 6 mm из фольги толщиной 100 μm (нержавеющая сталь) и плоским анодом, в качестве которого использовалась алюминиевая фольга толщиной 10 μm . Межэлектродный зазор варьировал от 6 (при искровой стадии разряда) до 12 mm (в случае исследования объемного разряда). Эксперименты на установке №3 проводились в режиме однократных импульсов. Удельная мощность энерговклада с генератором SLEP-150 превышала 100 MW/cm^3 .

Регистрация интегральной картины свечения разряда осуществлялась фотоаппаратом SONY A100 через боковое окно перпендикулярно продольной оси разрядного



Рис. 3. Фотографии различных стадий коронного разряда: *a* — первая наносекунда после пробоя промежутка, *b* — интервал времени 4–7 ns, *c* — 7–10 ns. Высоковольтный электрод находится снизу кадра.

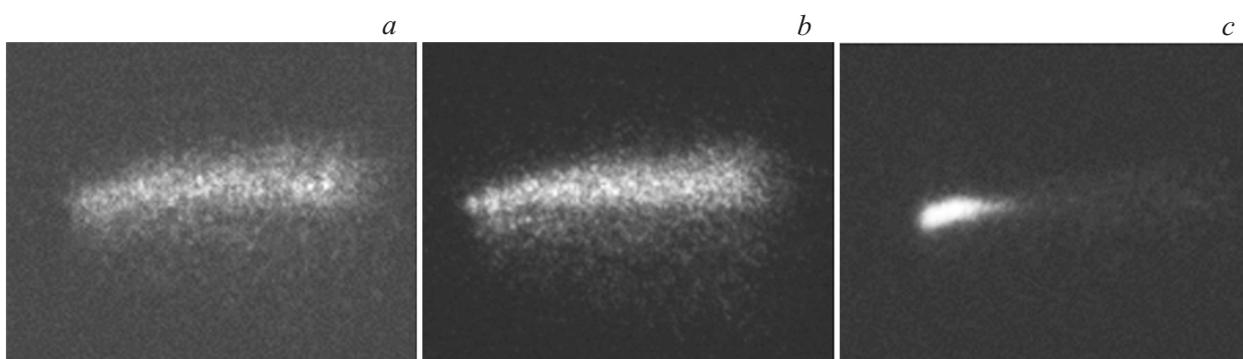


Рис. 4. Фотографии развития диффузного разряда: *a* — первая наносекунда после пробоя промежутка, *b* — интервал времени 1–4 ns, *c* — 4–7 ns. Катод находится слева.

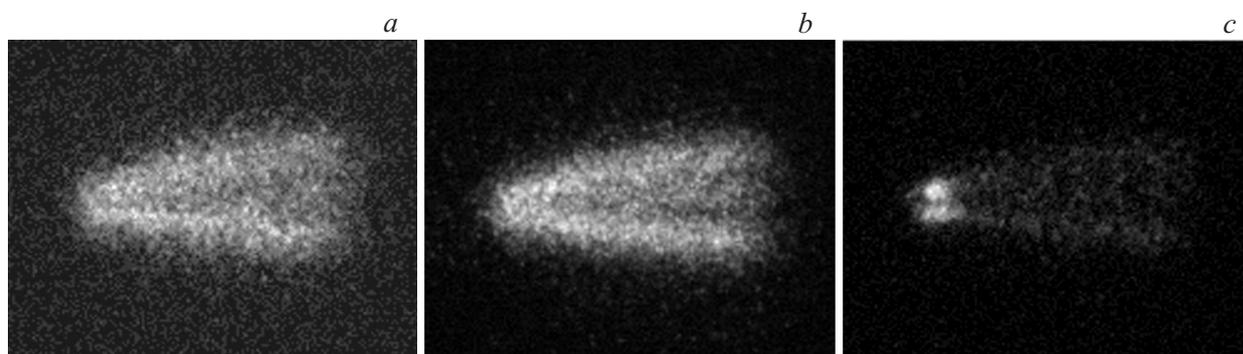


Рис. 5. Фотографии развития диффузного разряда в виде трех струй: *a* — первая наносекунда после пробоя промежутка, *b* — интервал времени 1–4 ns, *c* — 4–7 ns. Катод находится слева.

промежутка в случае установок № 1 и № 2, а на установке № 3 под углом $\sim 45^\circ$ к продольной оси промежутка. Свойства поверхности плоского электрода после обработки разрядом в различных режимах определялись с помощью оптического микроскопа ЛОМО МИКМЕД-1 вариант 2.

Исследования динамики формирования объемного разряда проводились с использованием четырехканальной CCD-камеры HSFC-PRO, которая с субнаносекундной точностью синхронизировалась с генераторами FPG-10 и FPG-60. С генератором SLEP-150 синхронизи-

ровать CCD-камеру не удалось из-за применения в нем неуправляемого обострительного разрядника Р-43. Для регистрации напряжения и тока разряда применялись цифровые осциллографы TDS 3034 (300 MHz, 2.5 GS/s) и DPO70604 (6 GHz, 25 GS/s).

2. Результаты и их обсуждение

На фотографиях, представленных на рис. 3, показана динамика формирования коронного разряда между

двумя остриями, удаленными на расстояние 4 mm друг от друга. Съемка проводилась с временным интервалом следования кадров 3 ns, время экспозиции первого кадра составляло 1 ns, второго и третьего — 3 ns.

Из рис. 3, а видно, что формирование короны происходит уже в течение первой наносекунды после пробоя межэлектродного промежутка. Плазменное образование, начинающееся от острия высоковольтного электрода, имеет характерные размеры ~ 2 mm (рис. 3) и перекрывает межэлектродный зазор только на половину. Максимальное свечение плазмы коронного разряда наблюдается у острия в первую наносекунду после пробоя. На 4–7-й наносекундах (рис. 3, b) разряд становится более однородным по объему при сохранении своей формы и размеров. Через 7 ns после пробоя интенсивность свечения уменьшается, а через 10 ns свечение в разрядном промежутке вообще перестает регистрироваться. Из данных фотографий следует, что при импульсах напряжения длительностью ~ 1 ns и амплитудой в десятки kV формируется диффузный коронный разряд.

При межэлектродном зазоре 2 mm в промежутке острие–плоскость формируется диффузный разряд, который примыкает к плоскому электроду (с генератором FPG-10 — к катоду). В данных условиях при больших частотах следования импульсов (сотни Hz) на плоском катоде появляются яркие пятна (см. фотографии в работе [14]), а на его поверхности видны кратеры. При малых частотах (единицы–десятки Hz) яркие пятна на плоском катоде отсутствуют и кратеры на его поверхности не образуются.

В экспериментах на установке № 2 разряд в геометрии острие–плоскость формировался от генератора FPG-60 с большими амплитудой и длительностью импульса напряжения отрицательной полярности. Благодаря отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны (острие) в промежутке с зазором 2 mm формировался ОРИПЭЛ без ярких пятен на плоском аноде. Интегральная картина свечения плазмы разряда представляла собой диффузно светящийся конус с вершиной у кромки острейного катода, расширяющийся до плоского анода. Диаметр светящейся области у анода равнялся ~ 1 mm. От импульса к импульсу характер свечения промежутка при ОРИПЭЛ несколько изменялся (рис. 4, 5).

В первом случае (рис. 4, a) видна одна яркая диффузная струя, которая за первую наносекунду после пробоя перемигает промежуток. Во временном интервале 1–4 ns от начала разряда (рис. 4, b) усиливается интенсивность излучения этой диффузной струи и становится более заметным излучение из области промежутка под ней. Далее интенсивность излучения в промежутке у плоского анода уменьшается, а у катода начинает формироваться искровой лидер [15], который перекрывает не более трети разрядного промежутка (рис. 4, c).

Во втором случае разряд начинает формироваться в виде трех конических плазменных струй с примерно одинаковой интенсивностью излучения, расходящихся от вершины острейного катода к плоскости анода (рис. 5).

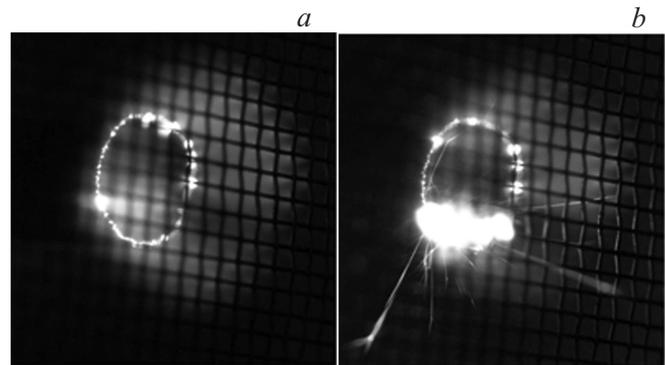


Рис. 6. Интегральные фотографии свечения: а — объемного и b — искрового разрядов, сделанные за 5 импульсов.

Во время первой наносекунды (рис. 5, a) разряд представляет собой диффузно светящийся конус, состоящий из трех струй. В следующие 3 ns (рис. 5, b) интенсивность свечения плазмы во всем объеме существенно не изменяется, а затем уменьшается (рис. 5, c). После 4 ns на острейном катоде появляются яркие пятна, но их интенсивность меньше, чем при формировании одной диффузной струи (рис. 4, c). После длительной работы установки в импульсно-периодическом режиме (более 10^6 импульсов) на острие катода образуется нагар и видны кратеры, а на аноде наблюдаются возникшие в результате окисления металла слабо заметные матовые пятна с равномерным градиентным распределением интенсивности „матовости“ вдоль радиуса пятна. Однако в отсутствие ярких пятен на аноде кратеры на плоском электроде не были зарегистрированы. Мы предполагаем, что это связано с малой длительностью импульса напряжения по сравнению с длительностью импульсов, используемых в работах [6–9], и малыми удельными энергетическими вкладами в газ. Поэтому были проведены эксперименты на установке с генератором SLEP-150.

Генератор SLEP-150 имеет на порядок большую мощность энерговклада (не менее 100 MW/cm^3), чем у генераторов FPG-10 и FPG-60. Однако длительности импульсов напряжения этих генераторов существенно не отличаются. Исследования воздействия плазмы разряда на анод на установке № 3 были проведены при формировании ОРИПЭЛ и ОРИПЭЛ, который переходил в искровую стадию. Фотографии интегрального свечения этих двух режимов разряда приведены на рис. 6.

При фотографировании в качестве анода выступала стальная сетка с пропусканием $\sim 60\%$, расстояние до которой от трубчатого катода в случае объемного разряда составляло 12 mm (рис. 6, a). Данные снимки являются наложением 5 импульсов. Объемный разряд сохранялся при сокращении межэлектродного расстояния до 6 mm, после чего на его фоне начинали формироваться искры (рис. 6, b). При формировании искры из катода вылетали частицы, которые можно было видеть по светящимся трекам в промежутке, которые хорошо видны на рис. 6, b.

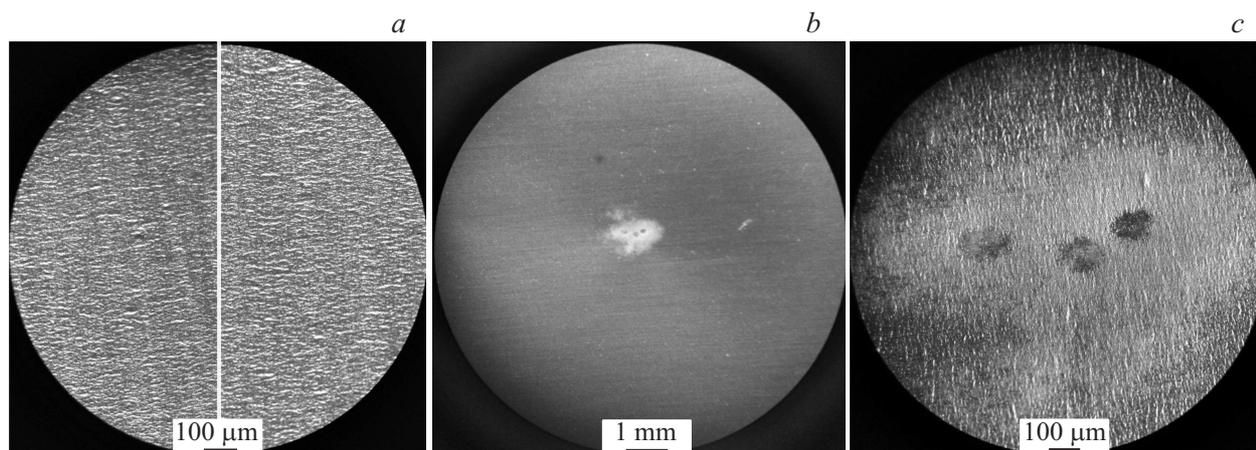


Рис. 7. Фотографии поверхности анода из алюминиевой фольги после воздействия: *a* — 20 импульсов объемного разряда (левая половина — поверхность до воздействия разряда), *b* и *c* — одного импульса искрового разряда при разном увеличении.

Форма объемного разряда представляла собой конус с усеченной вершиной, с диаметром вершины, равным диаметру трубчатого катода, и основанием на плоском аноде диаметром ~ 1 см. При исследовании воздействия разряда на анод, сетка заменялась на стальную пластину, на которую со стороны разряда накладывалась алюминиевая фольга толщиной $10\ \mu\text{m}$. На рис. 7 показаны фотографии автографов объемного и искрового разрядов, оставленных на поверхности фольги после воздействия 20 импульсов.

На левой половине рис. 7, *a* показана поверхность алюминиевой фольги до воздействия разряда, на правой после воздействия ОРИПЭЛ. Как видно из рис. 7, *a*, за 20 выстрелов объемный разряд не оставляет на поверхности анода каких-либо заметных следов, тогда как автограф искрового разряда за один импульс отчетливо виден (рис. 7, *b*, *c*) и представляет собой кратеры диаметром до $100\ \mu\text{m}$ и глубиной несколько μm . Вокруг кратеров образуются матовые пятна диаметром ~ 1 мм, образованные в результате термического нагрева, с характерной для оксида алюминия окраской. Автографы от искры в данных условиях меняли свое положение на поверхности анода.

Заключение

Проведены исследования динамики формирования объемного разряда в воздухе атмосферного давления в сильно неоднородном электрическом поле при импульсах напряжения наносекундной длительности от генераторов FPG-10 и FPG-60. Показано, что коронный разряд и ОРИПЭЛ формируются в первую наносекунду после пробоя газового промежутка. При ОРИПЭЛ плазма диффузного разряда перекрывает весь межэлектродный зазор, и при этом легко реализовать режим разряда без ярких пятен на плоском аноде. Интегральная фотография свечения разряда представляет собой равномерно светящийся конус. На 4-й ns происходит затухание све-

чения плазмы, и на остром катодном конусе могут формироваться яркие пятна.

В проведенных экспериментах как с генераторами FPG-10 и FPG-60, так и с генератором SLEP-150 структура разряда, состоящая из соосных скоплений светящихся токовых каналов, наблюдавшаяся ранее в работах [6–9], не наблюдалась. Вид автографов, оставленных на поверхности анода, свидетельствует о том, что в данных экспериментальных условиях (импульсы напряжения наносекундной длительности) интегральная структура объемного разряда имеет однородную диффузную форму, что делает применение такого разряда перспективным для модификации и обработки поверхностей различных материалов [11,12]. Представляет интерес продолжить исследования воздействия диффузных разрядов атмосферного давления, формируемых в неоднородном электрическом поле, на поверхность различных металлов при параметрах импульсов напряжения, соответствующих переходной области между условиями работ [6–9] и настоящей работы.

Исследование было выполнено за счет гранта Российской государственной академии наук (проект № 14-29-00052).

Список литературы

- [1] Runaway electrons preionized diffuse discharges. Ed. V.F. Tarasenko. NY: Nova Science Publishers, Inc., 2014. 598 p.
- [2] Baksh E.Kh., Burachenko A.G., Erofeev M.V., Lomaev M.I., Rybka D.V., Sorokin D.A., Tarasenko V.F. // Laser Physics. 2008. Vol. 18. P. 732–737.
- [3] Ерофеев М.В., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 10. С. 43–49.
- [4] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. 2003. № 3. С. 94–95.
- [5] Сорокин Д.А., Ломаев М.И., Банюкина Т.И., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 8. С. 13–20.
- [6] Карелин В.И., Тренькин А.А. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 2. С. 52–56.

- [7] Карелин В.И., Тренькин А.А. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 3. С. 29–35.
- [8] Перминов А.В., Тренькин А.А. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 9. С. 52–55.
- [9] Репьев А.Г., Репин П.Б., Покровский В.С. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 1. С. 56–62.
- [10] Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V., Shulepov M.A., Tarasenko V.F. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 185–201.
- [11] Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Кортаев А.Г., Коханенко А.П., Петерс А.С., Тарасенко В.Ф., Шулепов М.А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 333–336.
- [12] Efanov V.M. // IEEE, Conference Record of the 2000 Twenty-Fourth International Power Modulator Symposium, 50th Anniversary, 2000. P. 66–68.
- [13] Тарасенко В.Ф. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 5. С. 444–457.
- [14] Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Shut'ko Y.V. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2011. Vol. 39. N 11. P. 2096–2097.
- [15] Тарасенко В.Ф., Бакирт Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Шутько Ю.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 151–154.