

Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения при микросекундном фронте импульса напряжения

В. Ф. Тарасенко, А. Г. Бураченко, Е. Х. Бакшт

Приведены результаты исследований генерации пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения в неоднородном электрическом поле при давлениях воздуха, азота, аргона и гелия от 1 до 100 кПа. Использовался генератор, который формировал импульсы напряжения с фронтом $\sim 1,5$ мкс и амплитудой до 200 кВ. Рентгеновское излучение с помощью сцинтиллятора и ФЭУ было зарегистрировано за анодом из алюминиевой фольги во всём диапазоне давлений во всех четырёх газах. В гелии пучок убегающих электронов при давлении 100 кПа был зарегистрирован коллектором. В воздухе, азоте и аргоне пучок убегающих электронов с данным генератором имел сравнительно малые амплитуды, а также энергии и фиксировался коллектором только при низких давлениях (< 20 кПа). Установлено, что при микросекундной длительности фронта импульса напряжения необходимо использовать катоды, обеспечивающие наибольшие напряжения пробоя промежутка.

Ключевые слова: убегающие электроны, рентгеновское излучение, микросекундный фронт импульса напряжения, неоднородное электрическое поле.

Ссылка: Тарасенко В. Ф., Бураченко А. Г., Бакшт Е. Х. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 1. С. 21.

Reference: V. F. Tarasenko, A. G. Burachenko, and E. Kh. Baksht, Usp. Prikl. Fiz. **8** (1), 21 (2020).

Введение

Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения при импульсных высоковольтных разрядах в плотных газах является фундаментальным физическим явлением, имеющим и важное практическое значение, поскольку существенно влияет на характеристики пробоя различных газов в атмосферных и лабораторных условиях.

Первые работы, в которых сообщалось о регистрации рентгеновского излучения (РИ)

при пробое гелия [1, 2] и воздуха [3, 4] атмосферного давления (100 кПа), были опубликованы в 60-е годы прошлого столетия. В этих работах использовались импульсы напряжения сравнительно короткой длительности и катоды с малым радиусом кривизны. В режиме коронного разряда РИ было зарегистрировано в воздухе атмосферного давления при микросекундной длительности импульса напряжения с фронтом 100 нс [5]. Катодом в этой работе служила игла диаметром 0,7 мм, а амплитуда импульса напряжения достигала ~ 280 кВ. Длительность импульса РИ достигала 1 мкс и ограничивалась искровым пробоем промежутка.

В последние 20 лет РИ при пробое воздуха атмосферного давления исследовалось во многих работах как при напряжениях десятки-сотни киловольт [7–14], так и единицы мегавольт [15–17]. При напряжениях десятки-сотни киловольт обычно использовались

Тарасенко Виктор Федотович, г.н.с., д.ф.-м.н.
Бураченко Александр Геннадьевич, н.с., к.ф.-м.н.
Бакшт Евгений Хаимович, с.н.с., к.т.н.
Институт сильноточной электроники, СО РАН.
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.
E-mail: bag@loi.hcei.tsc.ru

Статья поступила в редакцию 13 февраля 2020 г.

© Тарасенко В. Ф., Бураченко А. Г., Бакшт Е. Х., 2020

импульсы напряжения с коротким фронтом (≤ 10 нс). В работах [15–17] применялись мегавольтные импульсы напряжения с микросекундным фронтом, которые подавались на промежутки метровой длины. Пробой в длинных промежутках происходил за счёт формирования лидера [18]. Однако пучки убегающих электронов (ПУЭ) в условиях мегавольтных импульсов напрямую коллектором не были зарегистрированы. По-видимому, это обусловлено малой плотностью тока пучка и его пространственной и амплитудной нестабильностью от импульса к импульсу, а также необходимостью располагать коллектор на больших расстояниях от высоковольтного электрода.

О регистрации пучка убегающих электронов в воздухе атмосферного давления при увеличении длительности фронта импульса напряжения до ~ 1 мкс сообщалось в статьях [19–22]. В этих работах использовались сантиметровые промежутки и импульсы напряжения с амплитудой ~ 80 кВ. Впервые при микросекундном фронте импульса напряжения ПУЭ был зарегистрирован в [19]. Для регистрации автографа пучка применялась рентгеновская фотоплёнка, а длительность импульса ПУЭ оценивалась с помощью сцинтиллятора и ФЭУ. Сообщалось, что энергия электронов (~ 70 кэВ) близка к eU_m , где e – заряд электронов, U_m – максимальное напряжение на промежутке. При улучшении временного разрешения в [20] было установлено, что ПУЭ имел субнаносекундную длительность импульса ($< 0,8$ нс). Отметим, что в [19, 20] применялись катоды сферической формы.

В работах [21, 22] при длительности фронта импульса напряжения 0,5 мкс были зарегистрированы как импульсы РИ, так и импульсы ПУЭ с помощью коллектора с временным разрешением $\sim 0,1$ нс. Было установлено, что с катодами сферической формы существует два основных режима генерации пучка убегающих электронов. В первом режиме (с наибольшими напряжениями пробоя и наибольшей средней напряжённостью электрического поля в промежутке) импульсы ПУЭ регистрировались коллектором при атмосферном давлении воздуха, и их длительность на полувысоте составляла от 100 пс до

нескольких наносекунд. Энергия основной части электронов в этом режиме была в два и более раз меньше максимального напряжения на промежутке, а длительность диффузной стадии разряда была не более 10 нс. Во втором режиме (при меньших напряжениях пробоя промежутка) длительность диффузной стадии разряда возрастала, на промежутке сохранялось высокое напряжение, и за анодной фольгой регистрировались импульсы РИ с длительностью на полувысоте до 100 нс. Замена сферического катода на трубчатый из фольги толщиной 100 мкм и диаметром 6 мм уменьшала напряжение пробоя, а также величину тока ПУЭ и энергию электронов. Сокращение фронта импульса напряжения до 200 нс позволило зарегистрировать за сетчатым анодом при атмосферном давлении воздуха и амплитуде импульса напряжения ~ 35 кВ импульсы ПУЭ длительностью 0,1 нс [23]. В работе [23] использовался катод из швейной иглы диаметром 1 мм с радиусом закругления 75 мкм.

Однако важно отметить, что одновременные исследования генерации РИ и ПУЭ в большинстве известных работ при микросекундном фронте импульса напряжения не проводились. Кроме того, эти исследования были направлены в основном на изучение характеристик пробоя воздуха при атмосферном давлении.

Цель данной работы – исследовать генерацию убегающих электронов и РИ при длительности фронта импульса напряжения 1,5 мкс и давлениях воздуха, азота, аргона и гелия от 1 до 100 кПа, а также сравнить полученные данные с другими известными результатами, полученными при микросекундном фронте импульса напряжения.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состояла из импульсного генератора, газоразрядной камеры с системой откачки и напуска газов, а также регистрирующей аппаратуры. В экспериментах применялся генератор на основе импульсного трансформатора. Конструкция разрядной камеры приведена на рис. 1.

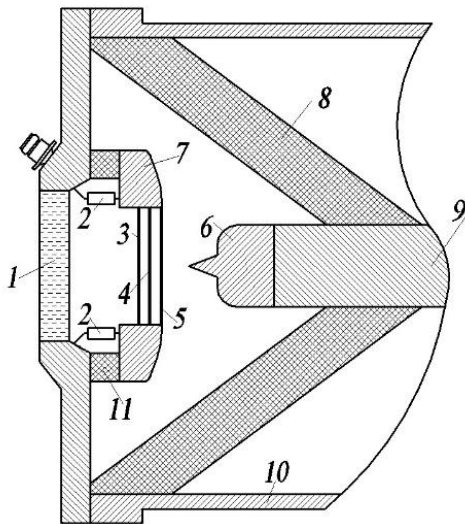


Рис. 1. Конструкция разрядной камеры: 1 – окно из кварца; 2 – сопротивления шунта; 3 – пленочный сцинтиллятор; 4 – металлическая фольга; 5 – анод из сетки; 6 – катод; 7 – фланец для крепления анодной сетки и сопротивлений шунта; 8 – изолятор разрядной камеры; 9 – высоковольтный электрод; 10 – корпус камеры и внешний цилиндр коаксиальной линии; 11 – изолятор шунта.

Напряжение от импульсного трансформатора подавалось на внутренний цилиндрический проводник 9 диаметром 60 мм и длиной 270 мм короткой коаксиальной линии. К торцу проводника крепились катоды различной конструкции. Использовались четыре вида катода.

Катод № 1 из фольги, как и в работе [24], был выполнен в виде трех коаксиально установленных трубок диаметрами 60, 44 и 28 мм. Высота трубок из фольги уменьшалась от центра к краю катода на 2 мм при каждом увеличении диаметра трубки. Для изготовления катода использовалась латунная фольга толщиной 50 мкм. Межэлектродное расстояние при работе с этим катодом составляло 44 мм.

Катод № 2 был изготовлен из нержавеющей стали в форме цилиндра диаметром 60 мм, у которого торец, обращенный к аноду, был скруглен с радиусом 47 мм, причем с плавным переходом по краям к боковой поверхности цилиндра. Межэлектродное расстояние с катодом № 2 составляло 20 или 40 мм.

Катод № 3 (узел 6 на рис. 1) был выпол-

нен в форме конуса высотой 20 мм с диаметром основания 7 мм, углом при вершине 20° и радиусом закругления вершины $\sim 0,1$ мм, который находился в центре торцевой части цилиндра диаметром 60 мм, края которого имели радиус закругления 15 мм. Межэлектродное расстояние с катодом № 3, который также был изготовлен из нержавеющей стали, составляло 40 мм.

В экспериментах по фотографированию разряда сбоку применялся катод № 4 из нержавеющей стали в виде иглы длиной 70 мм, который крепился к центральному электроду 9, укороченному до 140 мм. Изолятор 8 при этом убирался, и использовалась коаксиальная линия с боковым окном. Катод № 4 имел диаметр 3 мм, угол при вершине 36° и радиус закругления кончика иглы $\sim 0,1$ мм. Эксперименты с катодом № 4 были проведены при расстоянии между электродами 45 мм.

Внутренний диаметр внешнего цилиндра коаксиальной линии 10 равнялся 280 мм. Линия заканчивалась фланцем, к которому крепился изолятор газоразрядной камеры 8 и на нём устанавливался второй электрод 5. Электрод 5 был изготовлен из латунной сетки с пропусканием 50 % и соединен с корпусом камеры через шунт 2 из сопротивлений ТВО. Площадь сетчатой поверхности анода равнялась ~ 60 мм².

Генератор мог формировать импульсы напряжения как отрицательной, так и положительной полярности, амплитудой до 200 кВ с длительностью фронта 1,5 мкс. Амплитуда импульса напряжения на промежутке варьировалась при изменении зарядного напряжения конденсатора в первичном контуре импульсного трансформатора, величина которого составляла 65 нФ. Зарядное напряжение конденсатора могло изменяться от 7 до 12 кВ.

Разрядная камера заполнялась различными газами (воздух, азот, аргон и гелий) при давлениях от 1 до 100 кПа. Предварительная откачка проводилась форвакуумным насосом.

Регистрация импульсов напряжения осуществлялась с помощью резистивного делителя напряжения. Ток разряда измерялся с помощью шунта 2, изготовленного из сопротивлений ТВО. Ток ПУЭ регистрировался с помощью конических коллекторов, которые

устанавливались вместо кварцевого окна 1. Диаметр приёмной части коллекторов составлял 20 и 30 мм. Располагались они на расстоянии от сетчатого анода 53 и 12 мм соответственно.

При регистрации импульсов напряжения, тока разряда и тока пучка использовались осциллографы TDS 3032 (0,3 ГГц, частота дискретизации 2,5 ГС/с) и MDO 3104 (1 ГГц, частота дискретизации 5 ГС/с).

РИ регистрировалось с помощью ФЭУ-100 по свечению пленочного сцинтиллятора толщиной 150 мкм. Импульсная характеристика ФЭУ имела время нарастания ~ 3 нс и время спада ~ 30 нс. При регистрации РИ коллектор убирался, а на его место устанавливалось кварцевое окно 1 (см. рис. 1) диаметром 120 мм. За сетчатым анодом вплотную к нему устанавливались одна или несколько различных фольг (из алюминия толщиной 15, 30 и 55 мкм или из меди толщиной 25 и 40 мкм). Края фольги плотно крепились к фланцу 7, при этом края фольги дополнительно закрывались черной бумагой, препятствующей по-

паданию излучения разряда из газоразрядной камеры на ФЭУ. За фольгой располагался сцинтиллятор. Работа в режиме, близком к линейному, достигалась за счёт удаления ФЭУ от сцинтиллятора на расстояние до 35 см и установки сетчатых ослабителей.

В экспериментах использовались однократные импульсы напряжения отрицательной полярности. Свечение плазмы разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом Sony A100 как сбоку оси разряда с катодом № 4, так и с торца камеры через анодную сетку и кварцевое окно.

Экспериментальные результаты

Измерения тока пучка убегающих электронов

Осциллограмма импульса напряжения в режиме холостого хода генератора при отрицательной полярности генератора показана на рис. 2, а.

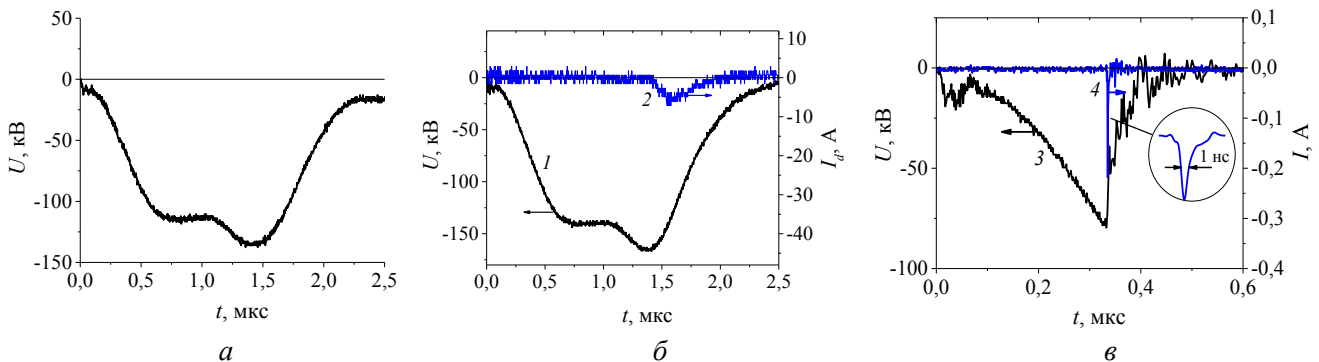


Рис. 2. Осциллограммы импульса напряжения холостого хода (а), импульсов напряжения (1) и тока разряда (2) с катодом № 4 при диффузном разряде в воздухе атмосферного давления (б), а также импульсов напряжения (3) и тока ПУЭ (4) в воздухе при давлении 6 кПа (в). Межэлектродное расстояние $d = 45$ мм для осциллограмм (а), (б). Катод № 3, $d = 40$ мм и коллектор с диаметром приемной части 30 мм для (в).

Видно (см. рис. 2, а), что длительность фронта импульса составляет 1,5 мкс, и он имеет ступеньку. Для получения этой осциллограммы, чтобы избежать пробоя промежутка, напряжение генератора было уменьшено.

В работе использовалась сравнительно большая длительность фронта импульса напряжения. Это приводило к существенному изменению времени запаздывания пробоя при вариации давления и сорта газа, а также конструкции катода и величины межэлектродного

промежутка. Соответственно, при этом изменялось и напряжение пробоя, в том числе от импульса к импульсу.

При пробое промежутка, в зависимости от условий, формировался как диффузный, так и искровой разряд. На рис. 2, б приведены осциллограммы импульса напряжения и тока разряда для случая диффузного разряда. Видно, что пробой произошёл в конце импульса напряжения и ток разряда из-за большого сопротивления плазмы разряда протекает в од-

ном направлении. Фотографии свечения диффузного разряда, а также диффузного, который трансформировался в искровой, показаны на рис. 3.

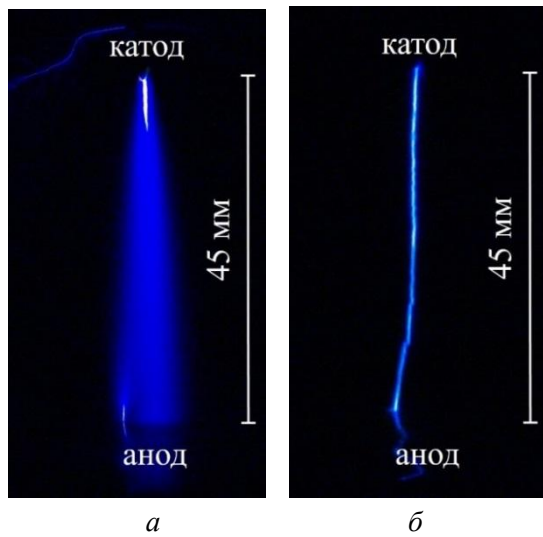


Рис. 3. Интегральные фотографии свечения диффузного разряда (а) и диффузного разряда, который трансформировался в искровой (б). Катод № 4, $d = 45$ мм.

В диффузном разряде у острия виден искровой лидер (яркий растущий канал), но его

длина в данном импульсе не превысила 6 мм. Также виден короткий искровой лидер у плоского анода. Отметим, что и при визуальном наблюдаемом искровом разряде (рис. 3, б), как и работах [21, 22], вначале разряд имел диффузную стадию, длительность которой зависела от многих факторов, а затем контрагировался.

Увеличение фронта импульса напряжения, как и следовало ожидать, привело к существенному уменьшению амплитуды тока ПУЭ и энергии электронов по сравнению с его параметрами при коротком фронте импульса напряжения [13, 24]. При атмосферном давлении ток пучка за анодом был зарегистрирован коллектором на данной установке с большими размерами разрядной камеры только в гелии и только с катодом № 2. Из-за малых энергий электронов при микросекундном фронте импульса напряжения измерения тока ПУЭ коллектором проводились за сетчатым анодом. Зависимости амплитуды тока пучка и напряжения пробоя промежутка от давления гелия с катодами № 1 и № 2 приведены на рис. 4.

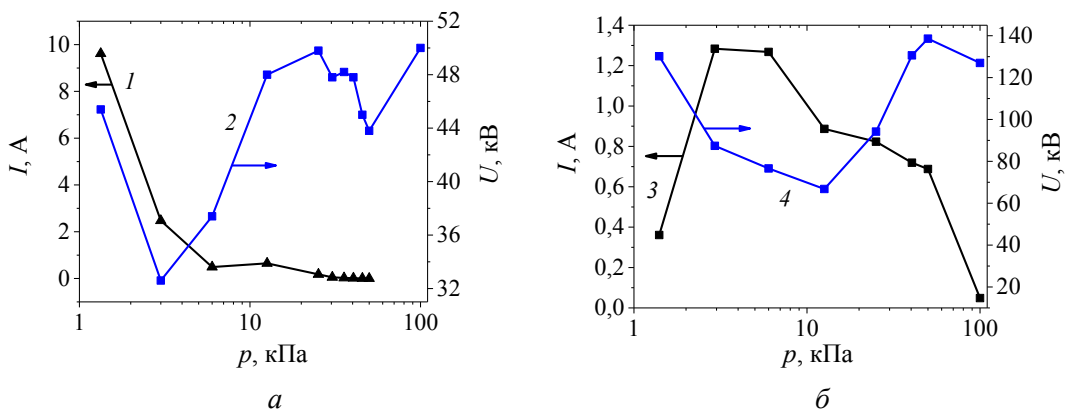


Рис. 4. Зависимости амплитуды тока пучка (1, 3) и напряжения пробоя промежутка (2, 4) от давления гелия с катодом № 1, $d = 44$ мм – (а) и катодом № 2, $d = 40$ мм – (б). Коллектор с диаметром приёмной части 20 мм.

При построении этих зависимостей для каждой точки на графике в серии из 10 измерений взяты импульсы с наибольшими амплитудами тока ПУЭ при каждом из давлений. Амплитуды импульсов напряжения приведены для соответствующих импульсов ПУЭ. Видно, что с катодом № 1 из трёх латунных трубок, которые были изготовлены из фольги и имели малый радиус кривизны, напряжение пробоя не превышало при всех давлениях

50 кВ. Это не позволило зарегистрировать ПУЭ при давлении 100 кПа. С катодом № 2, который имел большой радиус кривизны (47 мм), напряжение на промежутке возросло и превысило 120 кВ для атмосферного давления. Это позволило регистрировать ПУЭ в гелии при давлении 100 кПа. Однако при низких давлениях (1,3 и 3 кПа) токи пучка были больше с катодом № 1. Отметим, что применение катода № 2 из-за его большого радиуса кри-

визны приводило к существенно льшему разбросу амплитуд тока пучка от импульса к импульсу. Поэтому сравнение амплитуд тока пучка в аргоне, азоте и воздухе было проведено с катодом № 1. Полученные зависимости приведены на рис. 5.

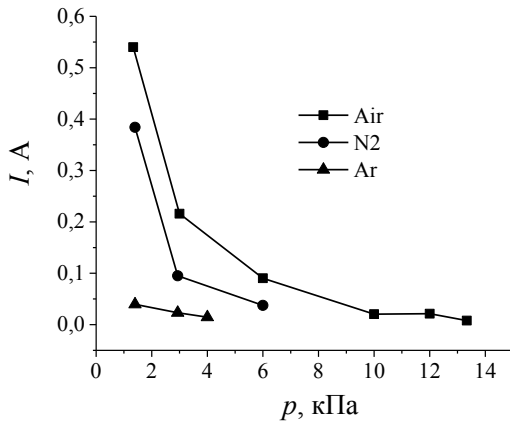
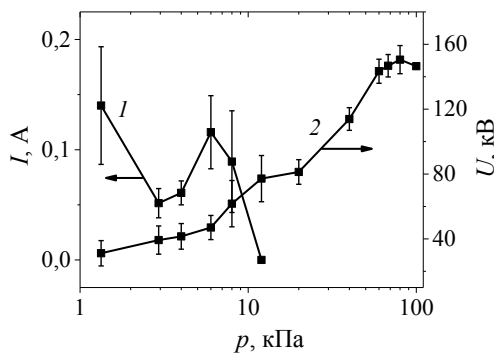


Рис. 5. Зависимости наибольших амплитуд тока пучка в аргоне, азоте и воздухе от давления. Катод № 1, $d = 44$ мм. Коллектор с диаметром приемной части 20 мм.

В воздухе из-за более высоких напряжений пробоя промежутка величина тока ПУЭ оказалась больше, чем в азоте. Наименьшие амплитуды регистрировались при заполнении газовой камеры аргонном (как и при фронте импульса напряжения длительностью ~ 10 нс с подобным катодом в работе [24]). При наносекундной и субнаносекундной длительности фронта импульса напряжения и атмосферном давлении амплитуда тока ПУЭ в аргоне также была наименьшей для этих 4-х исследованных газов [13, 25]. Однако в азоте ток пучка при одинаковых давлениях был обычно больше, чем в воздухе. Сравнение данных на рис. 4, а и рис. 5 показывает, что токи ПУЭ в гелии существенно больше во всём диапазоне исследованных давлений, чем в других газах.

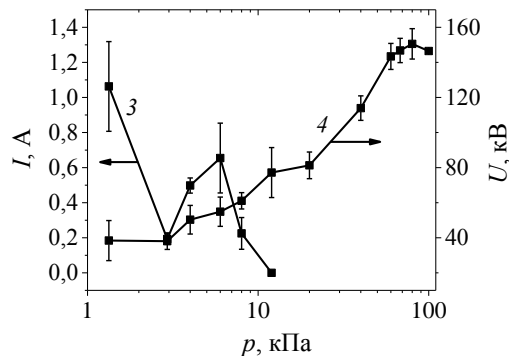


Это совпадает с данными, полученными ранее при коротком фронте импульса напряжения [25].

Осциллограммы тока ПУЭ и напряжения при пробое воздуха с катодом № 3 приведены на рис. 2, в. Длительность импульса тока пучка на полувысоте при давлении воздуха 6 кПа составила 1 нс, а его амплитуда $\sim 0,2$ А. При низких давлениях наблюдается быстрый спад напряжения на промежутке, что свидетельствует о малом сопротивлении разрядной плазмы после пробоя.

Как мы уже отмечали, эксперименты с катодом № 2 не позволяли локализовать разряд в одном положении относительно оси электродов. Это приводило к существенному изменению параметров ПУЭ от импульса к импульсу как при межэлектродном зазоре 20 мм, так и 40 мм. При $d = 20$ мм пробойные напряжения и амплитуды тока пучка уменьшались.

С катодом № 1 напряжения пробоя промежутка по сравнению с катодом № 2 были сравнительно малы, что затрудняло регистрацию ПУЭ и РИ, особенно при атмосферном давлении. Поэтому для проведения измерений ПУЭ и РИ был разработан катод № 3, который показан на рис. 1. Применение дополнительного конуса и расположение его на поверхности цилиндра со скруглёнными краями позволило сохранить сравнительно высокие напряжения пробоя промежутка, уменьшить разброс напряжений пробоя промежутка и стабилизировать место инициирования разряда в промежутке. На рис. 6 приведены зависимости тока пучка и напряжения пробоя промежутка от давления воздуха с катодом № 3.



а

б

Рис. 6. Зависимости тока ПУЭ (1, 3) и напряжения пробоя промежутка (2, 4) от давления воздуха с катодом № 3. Используются коллекторы диаметром 20 мм – (а) и 30 мм – (б). $d = 40$ мм.

Различие в диаметрах приёмной части коллекторов и в расстояниях до анодной сетки привело к различиям в амплитудах тока пучка примерно в 6 раз, но характер зависимостей не изменился. Такое большое различие в амплитудах ПУЭ при увеличении диаметра коллектора на 1 см и его площади в 2,25 раза и уменьшении расстояния до анодной сетки оказалось слишком большим, и эта особенность подтвердилась при измерениях РИ. Стабильность пробоя промежутка с катодом № 3

во всём диапазоне давлений существенно улучшилась. Пучок электронов регистрировался коллекторами во всех 4-х газах, однако только при давлениях ниже атмосферного.

На рис. 7 приведены фотографии свечения разряда в промежутке с катодом № 3 при давлениях воздуха 100, 40 и 6 кПа, полученные через кварцевое окно и сетчатый анод.

На фотографиях виден диффузный разряд и яркие точки на электродах, которые были соединены диффузными каналами.

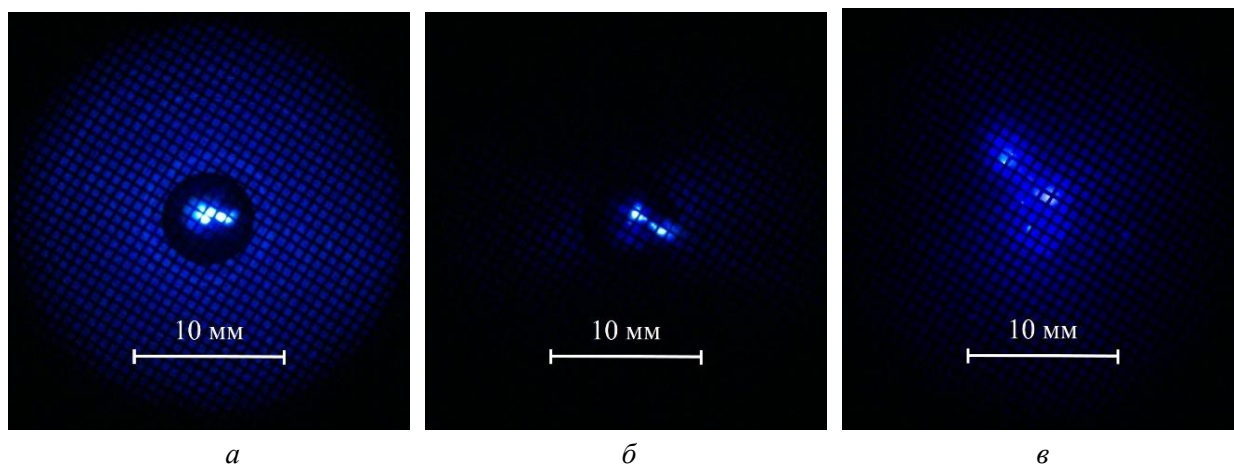


Рис. 7. Интегральные фотографии свечения разряда при давлениях воздуха 100 (а), 40 (б) и 6 кПа (в) и амплитуде импульса напряжения генератора ~ 150 кВ. Катод № 3. $d = 40$ мм. Диафрагменное число f фотоаппарата составляло 45 (а и б), и 20 (в).

С катодом № 3 при атмосферном давлении воздуха была зарегистрирована следующая неожиданная особенность разряда. С острия, как было показано ранее в подобных условиях [21, 22], формировался диффузный разряд, который затем переходил в диффузный канал с яркими точками на катоде и сетчатом аноде. Кроме того, с торца цилиндра диаметром 60 мм, на котором крепился конус, зажигался диффузный разряд. Интенсивность свечения диффузного разряда при атмосферном давлении была наибольшей у основания конуса, но боковая поверхность конуса на рис. 7, а была тёмной. При уменьшении давления диффузный разряд наблюдался в большем объёме разрядной камеры и у боковой поверхности конуса, но его интенсивность при

этом уменьшалась. Импульсы напряжения на промежутке для условий на рис. 7 приведены в следующем разделе.

Измерения интенсивности рентгеновского излучения

Эксперименты по регистрации импульсов РИ проводились при установке за сетчатым анодом и металлической фольгой (толщина и материал которой изменялись) пленочного сцинтиллятора (см. рис. 1). В большинстве экспериментов использовалась фольга из алюминия толщиной 15 мкм. РИ за этой фольгой по свечению сцинтиллятора было зарегистрировано с помощью ФЭУ при давлении 100 кПа во всех 4 газах. Интенсивность РИ, как и амплитуды тока ПУЭ, была наибольшей

в гелии и наименьшей в аргоне. При перекрытии окна ФЭУ дополнительным металлическим экраном импульсы РИ не регистрирова-

лись. Осциллограммы импульсов РИ, зарегистрированные ФЭУ по свечению сцинтиллятора, показаны на рис. 8.

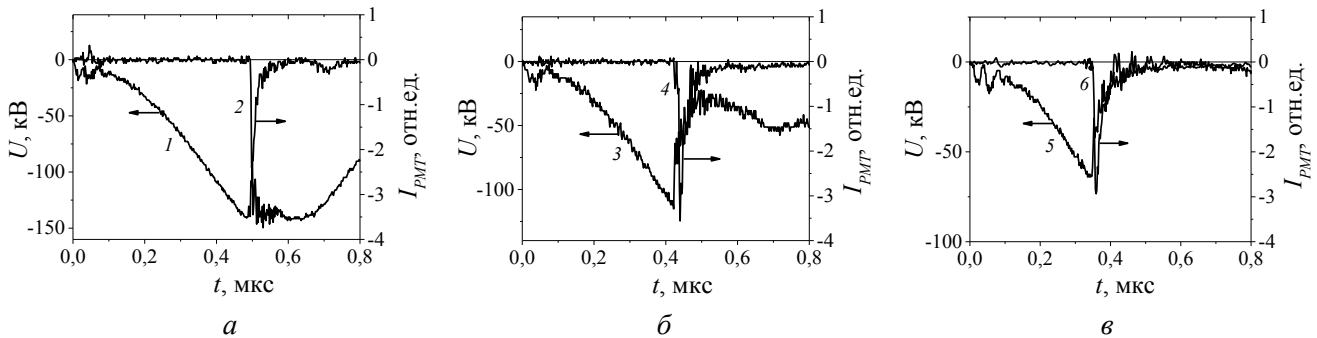


Рис. 8. Импульсы напряжения на промежутке (1, 3, 5) и рентгеновского излучения (2, 4, 6) за алюминиевой фольгой толщиной 15 мкм, регистрируемого ФЭУ по свечению сцинтиллятора. Давление воздуха 100 (а), 40 (б) и 6 кПа (в). Амплитуда импульса напряжения генератора ~150 кВ. Катод № 3. $d = 40$ мм.

Данные импульсы РИ соответствуют фотографиям разряда на рис. 7, которые были получены в отсутствие фольги и сцинтиллятора при такой же форме и амплитуде импульса напряжения. Для этого были проведены две серии экспериментов (не менее 20 импульсов в каждой). В одной серии экспериментов регистрировали импульсы свечения сцинтиллятора с помощью ФЭУ, напряжение и ток разряда. В другой серии регистрировали фотографии свечения разряда, напряжение и ток разряда. Затем выбирались фотографии разряда и импульсы свечения сцинтиллятора при одинаковых импульсах напряжения.

Первый импульс РИ возникал при первом частичном или полном пробое промежутка. Как видно из рис. 8, а, в воздухе атмосферного давления с катодом № 3 фиксировался режим разряда, при котором пробой с острия конуса не приводил к существенному спаду напряжения на промежутке. Кроме того, при давлении 100 кПа наблюдались вторые импульсы с ФЭУ, которые, как мы предполагаем, возникали при его повторном пробое за счет сохранения высокого напряжения на промежутке. На рис. 8, а этому соответствует второй максимум на осциллограмме с ФЭУ, который наблюдается при втором плавном спаде напряжения от уровня ~140 кВ через ~0,7 мкс после подачи импульса напряжения. Отметим, что время появления второго импульса, его амплитуда и длительность несколько изменялись от импульса к импульсу.

При давлении 40 кПа сократилось время запаздывания до первичного пробоя и уменьшилось напряжение на промежутке до ~50 кВ после первого частичного пробоя (см. рис. 8, б). Ярво выраженных вторых максимумов на осциллограмме с ФЭУ при этом уже не наблюдалось. При давлении воздуха 6 кПа напряжение на промежутке быстро спадало практически до нулевого уровня и вторые максимумы на осциллограмме с ФЭУ не регистрировались (рис. 8, в). «Хвосты» импульсов излучения с ФЭУ длительностью в несколько сотен наносекунд с малой амплитудой нельзя относить к свечению плёнки за счёт РИ из-за малой величины напряжения на промежутке при низких давлениях. По-видимому, они обусловлены несовершенством системы регистрации РИ.

Скорость спада напряжения на промежутке и остаточное напряжение на нём зависели от сорта газа и его давления, а также от формы разряда. По сравнению с азотом и воздухом, в аргоне и гелии наблюдался быстрый спад напряжения до малой величины, в том числе при давлении 100 кПа. В воздухе и азоте осциллограммы импульсов напряжения были подобны. Отметим, что при быстром формировании искры напряжение на промежутке в воздухе и азоте также уменьшалось до малой величины за время ~10 нс, в том числе при атмосферном давлении. Осциллограмма импульса напряжения в этом случае была подобна показанной на рис. 8, в. Вторые импульсы РИ в этом слу-

чае не регистрировались.

При измерении тока ПУЭ отмечалось, что ток пучка с катодом № 3 значительно возрос при увеличении диаметра приёмной части коллектора на 1 см. Эта особенность при использовании катода № 3 была подтверждена в процессе измерений интенсивности РИ. Были проведены измерения интенсивности РИ с двумя дополнительными экранами. В первом случае использовалась диафрагма из медной фольги толщиной 40 мкм с отверстием диаметром 1,4 см в центре. Во втором случае в центре анодной фольги из алюминия толщиной 15 мкм напротив острия конуса располагался дополнительный экран диаметром 1,4 см из той же медной фольги толщиной 40 мкм. Интенсивность РИ на оси разрядного промежутка, проходящего через отверстие в диафрагме, была малой – не более 10 % от суммарной. Напротив, при установке экрана диаметром 14 мм в центре алюминиевой фольги амплитуда сигнала с ФЭУ практически не изменилась. Можно отметить только небольшое сокращение длительности импульса РИ. Следовательно, основной вклад в регистрируемые импульсы свечения с ФЭУ дает разряд с плоской поверхности катода № 3, а не разряд с острия конуса.

Интегральные фотографии свечения разряда при давлении 100 кПа показаны на рис. 7, а. В центре видна область яркого свечения разряда и электродных пятен. При установке между сцинтиллятором и сетчатым анодом медной фольги толщиной 40 мкм РИ не регистрировалось.

Обсуждение полученных результатов

Исследование пробоя с помощью генератора, формирующего импульсы напряжения с амплитудой ~ 150 кВ и микросекундной длительностью фронта, подтверждает, что убегающие электроны и РИ генерируются при атмосферном давлении воздуха и других газов в условиях микросекундных фронтов импульсов высокого напряжения. Однако амплитуды тока ПУЭ существенно меньше, чем при более коротком фронте импульса напряжения. Сравнение полученных данных на одинаковой

разрядной камере с катодом № 1 с результатами работы [24], в которой применялся генератор с фронтом импульса напряжения ~ 10 нс, показало, что ток ПУЭ в азоте и аргоне существенно уменьшился. Однако и при малых амплитудах тока пучка число генерируемых электронов и квантов РИ оказывается достаточным для формирования диффузного разряда. По-видимому, этому способствуют малые энергии электронов и РИ.

В эксперименте энергия электронов оценивалась по ослаблению РИ фольгами. Увеличение толщины алюминиевой фольги с 15 до 30 мкм существенно не повлияло на амплитуду первого импульса с ФЭУ, однако вторые импульсы перестали регистрироваться. С алюминиевой фольгой толщиной 55 мкм и медной фольгой толщиной 25 мкм амплитуда первого импульса с ФЭУ уменьшились примерно на порядок, а за медной фольгой толщиной 40 мкм импульсы РИ не регистрировались. Оценка энергии основного количества рентгеновских квантов в первых импульсах по их ослаблению в фольгах показала, что она составляет ~ 6 кэВ. Соответственно, и энергия основного числа электронов ПУЭ не должна существенно превышать 6 кэВ. Как известно (см., например, данные для воздуха в [26]), при таких энергиях электронов сечение ионизации для различных газов весьма высоко.

Также следует отметить влияние на энергию электронов размеров камеры. В [21, 22] диаметр изолятора газового диода равнялся 68 мм, и энергия электронов при формировании импульсов ПУЭ в воздухе атмосферного давления длительностью ~ 0,1 нс превышала 10 кэВ. Благодаря этому ПУЭ в [21, 22] регистрировался за тонкой фольгой. В данной работе, при примерно одинаковых задержках до частичного пробоя промежутка, диаметр изо-

льные размеры (280 мм). Это привело к уменьшению энергии электронов в воздухе атмосферного давления. Причина, по-видимому, связана с влиянием диаметра коаксиальной линии на фронт импульса тока разряда в газовом диоде. Это оказывает заметное влияние при формировании импульсов ПУЭ с длительностью ~ 0,1 нс.

Основная причина существенного уменьшения числа убегающих электронов при микросекундном фронте импульса напряжения обусловлена низкими пробойными напряжениями. При фронте импульса напряжения > 500 нс напряжения пробоя близко к статическому пробивному [18]. Применение катодов с малым радиусом кривизны дополнительно уменьшает пробивное напряжение, соответственно, ухудшает условия для генерации убегающих электронов. Поэтому зарегистрировать ПУЭ легче при использовании сферических катодов. В данной работе за счет применения катода № 3, состоящего из конуса, установленного на плоской части цилиндра, удалось сохранить сравнительно высокие напряжения пробоя промежутка при давлении 100 кПа, а также обеспечивалась стабильность напряжения пробоя и расположения разряда в промежутке. Кроме того, с катодом № 3 за счёт небольшого спада напряжения на промежутке удалось зарегистрировать генерацию вторых импульсов РИ при повторном пробое промежутка.

Заключение

Проведённые исследования подтвердили, что при пробое воздуха атмосферного давления импульсами высокого напряжения генерируются убегающие электроны, появление которых легко зарегистрировать по тормозному РИ с помощью сцинтиллятора и ФЭУ. Рентгеновское излучение также было зарегистрировано при пробое аргона, азота и гелия при атмосферном давлении. В гелии при атмосферном давлении ПУЭ был зарегистрирован также коллектором.

Установлено, что на генерацию убегающих электронов существенное влияние оказывает конструкция катода, при этом наилучшие результаты по интенсивности и стабильности места возникновения РИ на аноде достигаются при использовании катодов, имеющих две части, причем как с малым, так и с большим радиусом кривизны. При этом убегающие электроны в основном генерируются в диффузном разряде с поверхности электрода с большим радиусом кривизны.

Показано, что при атмосферном давлении воздуха с острия происходит частичный пробой промежутка, и напряжение существенно не уменьшается.

Выявлено, что число генерируемых убегающих электронов и рентгеновских квантов при микросекундном фронте импульсов напряжения оказывается достаточным для формирования при повышенных давлениях различных газов диффузных разрядов. Длительность диффузной стадии разряда, который может переходить в искровой, сильно зависит, при прочих равных условиях, от конструкции катода и величины межэлектродного промежутка.

Работа поддержана грантом РФФИ
(проект № 18-52-53003_ГФЕН_а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Frankel S., Highland V., Sloan T., Van Dyck O., Wales W. // Nuclear Instruments and Methods. 1966. Vol. 44. No. 2. P. 345.
2. Noggle R. C., Krider E. P., Wayland J. R. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. No. 10. P. 4746.
3. Станкевич Ю. Л., Калинин В. Г. // ДАН СССР. 1967. Т. 177. № 1. С. 72.
4. Тарасова Л. В., Худякова Л. Н. // ЖТФ. 1969. Т. 39. № 8. С. 1530.
5. Босамыкин В. С., Карелин В. И., Павловский А. И., Репин П. Б. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. № 14. С. 885.
6. Тарасенко В. Ф., Любутин С. К., Ружин С. Н., Словицкий Б. Г., Костыря И. Д., Орловский В. М. // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 11. С. 69.
7. Репьев А. Г., Репин П. Б. // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 1. С. 78.
8. Chaparro J. E., Justis W., Krompholz H. G., Hatfield L. L., Neuber A. A. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. Vol. 36. No. 5. P. 2505.
9. Zhang C., Shao T., Yu Y., Niu Z., Yan P., Zhou Y. // Review of Scientific Instruments. 2010. Vol. 81. No. 12. P. 123501.
10. Shao T., Tarasenko V. F., Zhang C., Rybka D. V., Kostyrya I. D., Kozыrev A. V., Yan P., Kozhevnikov V. Yu. // New Journal of Physics. 2011. Vol. 13. No. 11. P. 113035.
11. Yatom S., Levko D., Gleizer J. Z., Vekselman V., Krasik Y. E. // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 100. No. 2. P. 024101.
12. Тарасенко В. Ф., Бакирт Е. Х., Бураченко А. Г., Ломаев М. И. // Прикладная физика. 2016. № 4. С. 49.
13. Tarasenko V. F. (Ed.). Generation of runaway electron beams and X-rays in high-pressure gases, Volume

1: Techniques and Measurements. – New York: Nova Science Publishers, 2016.

14. da Silva C. L., Millan R. M., McGaw D. G., Yu C. T., Putter A. S., Labelle J., Dwyer J. // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. No. 21. P. 11,174.

15. Dwyer J. R., Saleh Z., Rassoul H. K., Concha D., Rahman M., Cooray V., Jerauld J., Uman M. A., Rakov V. A. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008. Vol. 113. No. D23207.

16. March V., Montanyà J. // Geophys. Res. Lett. 2010. Vol. 37. No. 19. P. L19801.

17. Kochkin P., Köhn C., Ebert U., and van Deursen L. // Plasma Sources Science and Technology. 2016. Vol. 25. No. 4. P. 044002.

18. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Интеллект, 2009.

19. Лойко Т. В. // ЖТФ. 1980. Т. 54. С. 392.

20. Бабич Л. П., Лойко Т. В. // ДАН. 2009. Т. 429. № 1. С. 35.

21. Костыря И. Д., Тарасенко В. Ф. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 3. С. 294.

22. Sorokin D. A., Tarasenko V. F., Zhang C., Kostyrya I. D., Qiu J., Yan P., Baksht E. K., Shao T. // Laser and Particle Beams. 2018. Vol. 36. No. 2. P. 186.

23. Tarasenko V., Beloplotov D., Lomaev M. and Sorokin D. // Plasma Science and Technology. 2019. Vol. 21. No. 4. P. 044007.

24. Ерофеев М. В., Костыря И. Д., Тарасенко В. Ф. // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 10. С. 43.

25. Tarasenko V. F., Baksht E. K., Beloplotov D. V., Burachenko A. G., Lomaev M. I., Sorokin D. A. // Laser and Particle Beams. 2016. Vol. 34. No. 4. P. 748.

26. Chanrion O., Neubert T. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2010. Vol. 115. No. A6. P. A00E32.

PACS: 52.80.Tn; 29.40.Mc

Generation of runaway electrons and X-ray at a microsecond voltage rise time

V. F. Tarasenko, A. G. Burachenko, and E. Kh. Baksht

Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Academicheskoy Ave., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: bag@loi.hcei.tsc.ru

Received February 13, 2020

The results of studies of the generation of runaway electron beams and X-ray radiation in an inhomogeneous electric field at pressures of air, nitrogen, argon and helium ranged from 1 to 100 kPa are presented. A pulser generating voltage rise time of $\sim 1.5 \mu\text{s}$ and an amplitude of up to 200 kV was used. X-ray radiation was detected by a scintillator and a PMT behind an aluminum foil anode in the total pressure range in all four gases. In helium, a runaway electron beam at a pressure of 100 kPa was recorded by a collector. In air, nitrogen, and argon, a runaway electron beam had relatively small amplitudes and energies, and was recorded by the collector only at low pressures ($< 20 \text{ kPa}$). For a microsecond voltage rise time, it is necessary to use cathodes providing the highest gap breakdown voltages.

Keywords: runaway electrons, X-ray radiation, microsecond voltage rise time, non-uniform electric field.

REFERENCES

1. S. Frankel, V. Highland, T. Sloan, O. Van Dyck, and W. Wales, Nuclear Instruments and Methods. **44**, 345

- (1966).
2. R. C. Noggle, E. P. Krider, and J. R. Wayland, *J. Appl. Phys.* **39**, 4746 (1968).
 3. Yu. L. Stankevich and V. G. Kalinin, *Doklady Akademii Nauk SSSR* **177**, 72 (1967).
 4. L. V. Tarasova and L. N. Khudyakova, *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. **39**, 1530 (1969).
 5. V. S. Bosamykin, V. I. Karelin, A. I. Pavlovskii, and P. B. Repin, *Sov. Tech. Phys. Lett.* **6**, 885 (1980).
 6. V. F. Tarasenko, S. K. Lyubutin, S. N. Rukin, B. G. Slovikovskii, I. D. Kostyrya and V. M. Orlovskii, *Technical Physics*. **50**, 1462 (2005).
 7. A. G. Rep'ev and P. B. Repin, *Technical Physics*. **53**, 73 (2008).
 8. J. E. Chaparro, W. Justis, H. G. Krompholz, L. L. Hatfield and A. A. Neuber, *IEEE Transactions on Plasma Science*. **36**, 2505 (2008).
 9. C. Zhang, T. Shao, Y. Yu, Z. Niu, P. Yan, and Y. Zhou, *Review of Scientific Instruments*. **81**, 123501 (2010).
 10. T. Shao, V. F. Tarasenko, C. Zhang, D. V. Rybka, I. D. Kostyrya, A. V. Kozyrev, P. Yan, and V. Yu. Kozhevnikov, *New Journal of Physics* **13**, 113035 (2011).
 11. S. Yatom, D. Levko, J. Z. Gleizer, V. Vekselman, and Y. E. Krasik, *Applied Physics Letters* **100**, 024101 (2012).
 12. V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, A. G. Burachenko, and M. I. Lomaev, *Plasma Physics Reports*. **43**, 792 (2017).
 13. V. F. Tarasenko (Ed.), *Generation of runaway electron beams and X-rays in high-pressure gases, Volume I: Techniques and Measurements* (Nova Science Publishers, New York, 2016).
 14. C. L. da Silva, R. M. Millan, D. G. McGaw, C. T. Yu, A. S. Putter, J. Labelle, J. Dwyer, *Geophys. Res. Lett.* **44**, 11,174 (2017).
 15. J. R. Dwyer, Z. Saleh, H. K. Rassoul, D. Concha, M. Rahman, V. Cooray, J. Jerauld, M. A. Uman, and V. A. Rakov, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. **113**, (2008).
 16. V. March, J. Montanyà, *Geophys. Res. Lett.* **37**, L19801 (2010).
 17. P. Kochkin, C. Köhn, U. Ebert and L. van Deursen, *Plasma Sources Science and Technology* **25**, 044002 (2016).
 18. Yu. P. Raizer, *Gas discharge physics* (Intellect, Dolgoprudnyi, 2009) [in Russian].
 19. T. V. Loiko, *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. **50**, 392 (1980).
 20. L. P. Babich, T. V. Loiko, *Doklady Physics*. **54**, 479 (2009).
 21. I. D. Kostyrya, V. F. Tarasenko, *Plasma Phys. Rep.* **41**, 269 (2015).
 22. D. A. Sorokin, V. F. Tarasenko, C. Zhang, I. D. Kostyrya, J. Qiu, P. Yan, E. K. Baksht, and T. Shao, *Laser and Particle Beams*. **36**, 186 (2018).
 23. V. Tarasenko, D. Beloplotov, M. Lomaev, and D. Sorokin, *Plasma Science and Technology*. **21**, 044007 (2019).
 24. M. V. Erofeev, I. D. Kostyrya, and V. F. Tarasenko, *Technical Physics*. **52**, 1291 (2007).
 25. V. F. Tarasenko, E. K. Baksht, D. V. Beloplotov, A. G. Burachenko, M. I. Lomaev, and D. A. Sorokin, *Laser and Particle Beams*. **34**, 748 (2016).
 26. O. Chanrion and T. Neubert, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. **115**, A00E32 (2010).