

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.527.9; 537.53

**Излучение диффузного коронного разряда в воздухе
атмосферного давления**

**А.В. Козырев, В.Ю. Кожевников, И.Д. Костыря, Д.В. Рыбка,
В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц***

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 15.07.2011 г.

В воздухе атмосферного давления исследовано оптическое и рентгеновское излучение из коронного разряда. При различных параметрах импульса напряжения в области 200–850 нм получены спектры оптического излучения. Показано, что при увеличении длительности импульса напряжения режим коронного разряда изменяется, при этом коронный разряд становится источником УФ-излучения не только полос 2+ системы азота, а также и материала электрода. Показано, что формирование диффузных коронных разрядов в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях обусловлено генерацией быстрых электронов и рентгеновского излучения. Теоретически установлено, что быстрые электроны, возникающие при разрядах в воздухе атмосферного давления, порождают кванты К-излучения кислорода с энергией 525 эВ. Из расчетов следует, что эти кванты могут эффективно инициировать новые электроны в окрестности области усиленного поля. Данный процесс объясняет формирование диффузных форм разряда при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны и атмосферном давлении воздуха, а также быстрое продвижение катодонаправленного стримера.

Ключевые слова: излучение коронного разряда, стример, убегающие электроны, характеристическое рентгеновское излучение, атмосферное давление воздуха; radiation of corona discharge, streamer, runaway electrons, characteristic X-ray radiation, atmospheric pressured air.

Введение

Импульсные разряды постоянно происходят в атмосфере Земли и оказывают существенное влияние на жизнедеятельность человека. Поэтому исследованию атмосферных разрядов, в том числе различных типов молний, уделялось и уделяется большое внимание (см. [1–4] и ссылки в них). Однако место и время возникновения атмосферных разрядов постоянно меняются. Кроме того, атмосферные разряды обладают большой энергией и могут повредить аппаратуру для измерений, а также представляют опасность для жизни исследователей. Для изучения физических процессов в атмосферных разрядах широко используют лабораторные разряды большой и малой мощности [3–16]. В частности, в лабораториях проводятся исследования коронного разряда, который обычно возникает на электродах с малым радиусом кривизны. Известно, что коронный разряд в различных газах при повышенных давлениях, в том числе в воздухе атмосферного давления, является диффузным [5, 6, 11, 12]. Однако причина диффузного характера коронного разряда при повышенных давлениях до настоящего

времени подробно не исследовалась. Коронный разряд возникает как при отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны, так и при положительной. Отметим, что процессы, происходящие при коронном разряде, можно сравнить с процессами, происходящими в области перед лидером линейной молнии. С увеличением амплитуды импульса напряжения и(или) его длительности коронный разряд переходит в искровой, что также может моделировать фазу прихода лидера молнии к противоположному электроду.

В настоящей статье представлены результаты исследования оптического и рентгеновского излучения из импульсного коронного разряда в воздухе атмосферного давления при различных параметрах импульса напряжения и предложен механизм пре-дыонизации промежутка при формировании коронного и диффузного разрядов в неоднородном электрическом поле, который заключается в генерации мягкого характеристического излучения и фотоионизации плотного газа квантами этого излучения.

Известно, что при короткой длительности импульса высокого напряжения и его отрицательной полярности на электроде с малым радиусом кривизны за счет генерации убегающих электронов без дополнительного источника для пре-дыонизации промежутка можно формировать диффузные (объемные) разряды (см., например, [13] и ссылки в ней). Однако диффузный разряд, замыкающий промежуток,

* Андрей Владимирович Козырев; Василий Юрьевич Кожевников; Игорь Дмитриевич Костыря; Дмитрий Владимирович Рыбка; Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Дмитрий Владимирович Шитц.

и коронный диффузный разряд в широком диапазоне экспериментальных условий формируются не только при отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны, но при положительной полярности [5, 6, 11–14]. Диффузные формы разрядов в воздухе атмосферного давления и в других газах наблюдаются при сравнительно малых амплитудах импульсного напряжения, а также при постоянном напряжении на промежутке [5]. Эти обстоятельства позволяют предположить, что существует дополнительный механизм предьонизации промежутка, обеспечивающий формирование диффузных форм разряда при использовании электрода или обоих электродов с малым радиусом кривизны.

Установки и методики

Экспериментально различные формы разряда в воздухе атмосферного давления изучались с использованием трех генераторов импульсов высокого напряжения, которые подключались к электроду в виде острия или трубки. Это позволяло формировать коронный, диффузный, завершённый и искровой разряды при напряжениях от 10 до 300 кВ, а также при различных длительностях и полярностях импульса напряжения.

Генератор импульсов высокого напряжения № 1 был собран на базе трансформатора Тесла. Коммутатором служила лампа ГУ-81. Генератор формировал импульсы напряжения, состоящие из отдельных цугов длительностью 10 мс, которые следовали с частотой 50 Гц. Каждый цуг состоял из синусоидального сигнала с частотой колебаний 289 кГц. Высоковольтные импульсы прикладывались к цилиндрическому алюминиевому электроду диаметром 3,6 мм с вершиной в форме острия. При удалении заземленного электрода на расстояние от острия 40 см и более в воздухе атмосферного давления формировался коронный разряд. При меньших зазорах формировался слаботочный искровой разряд, ток которого не превышал 10 А. Для измерения амплитуды напряжения и формы сигнала в первичной и вторичной цепи высоковольтного трансформатора использовались омические делители напряжения. На рис. 1 показаны импульсы напряжения во вторичной цепи импульсного трансформатора во время формирования коронного разряда, а также центральная часть цуга импульсов. Наибольшая разность между положительным и отрицательным максимумами напряжения в цуге достигала 250 кВ.

Генератор № 2 формировал импульсы напряжения амплитудой 5–10 кВ, которые следовали с частотой 100 кГц и имели длительность на полувывоте ~1,5 мкс. Полярность импульсов напряжения через каждые два импульса одной полярности изменялась на противоположную. Кроме того, использовался режим пачек импульсов с длительностью одной пачки 10 мс и различными паузами между пачками импульсов. Генератор подключался к острию диаметром 1 мм и радиусом округления 50 мкм.

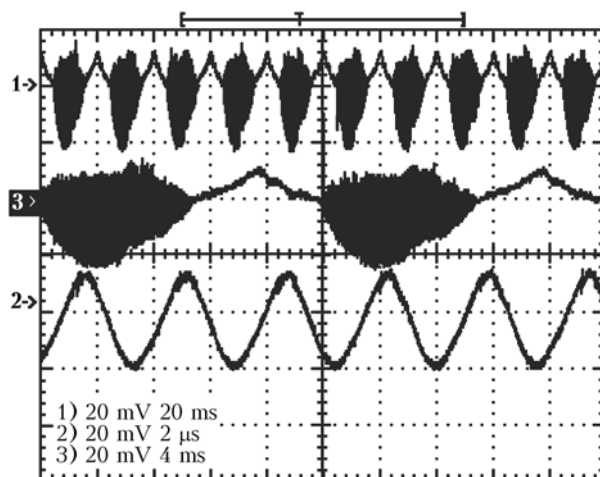


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения на выходе генератора № 1 при различных развертках осциллографа: 1 – 20 мс/дел, 2 – 2 мкс/дел, 3 – 4 мс/дел. Масштаб по вертикали 156 кВ/дел

Конструкция установки с генератором № 3 показана на рис. 2.

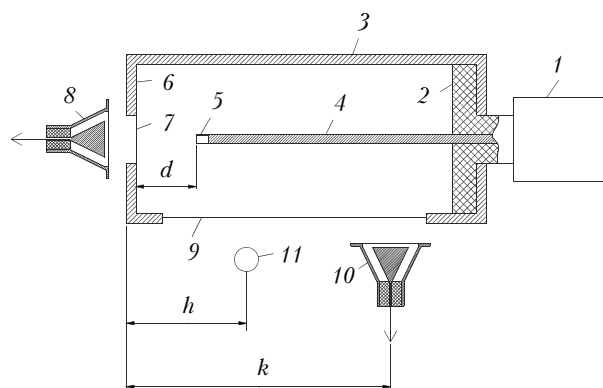


Рис. 2. Установка с генератором № 3: 1 – генератор; 2 – изолятор; 3 – цилиндрический корпус коаксиальной линии; 4 – внутренний электрод коаксиальной линии; 5 – катод из латунной трубки; 6 – металлическая пластина; 7 – фольга; 8 – коллектор; 9 – боковое окно из фольги; 10 – коллектор; 11 – дозиметр

На разрядный промежуток подавались импульсы напряжения от рентгеновского аппарата АРИНА. Генератор № 3 формировал импульсы напряжения с амплитудой до 300 кВ. Данная амплитуда импульса напряжения соответствовала амплитуде падающей волны напряжения в начале коаксиальной линии. Длительность импульса напряжения на полувывоте при согласованной нагрузке составляла ~2 нс, а длительность фронта импульса напряжения была не более 0,5 нс. К генератору крепилась цилиндрическая камера 3, которая являлась коаксиальной воздушной линией с волновым сопротивлением ~190 Ом. Внутренний проводник линии 4, торец которого являлся трубчатым катодом 5, имел внешний диаметр 7 мм. Катод был изготовлен из латунной трубки с толщиной стенки 0,3 мм и имел внешний диаметр 7 мм. Межеlectродный зазор d мог изменяться от 10 до 80 мм.

Подобная конструкция разрядной камеры позволяла формировать коронный разряд между внутренним и внешним цилиндром коаксиальной линии, а за счет диффузного разряда между электродами 5 и 7 уменьшать колебания напряжения в коаксиальной линии. Внешний цилиндр линии был изготовлен из медной фольги толщиной 200 мкм, и его внутренний диаметр равнялся 160 мм. Длина линии от изолятора до противоположного торца составляла 30 см. Линия заканчивалась плоской медной пластинкой 6. Медная пластинка имела в центральной части отверстие диаметром 40 мм, которое закрывалось AlBe-фольгой толщиной 50 мкм 7. Это позволяло с помощью коллектора 8 регистрировать пучок электронов из разряда между кромкой катода 5 и AlBe-фольгой (анодом) 7. Боковая цилиндрическая стенка камеры (линии) имела прямоугольное окно 9 длиной 25 см и шириной 5 см, которое закрывалось Al-фольгой толщиной 15 мкм, или сеткой, или медной фольгой толщиной 200 мкм. Ток пучка за прямоугольным окном, закрытым Al-фольгой, регистрировался коллектором 10, а рентгеновское излучение дозиметром 11. Временное разрешение коллекторов было не хуже 100 пс [13].

Для регистрации рентгеновского излучения использовались ФЭУ и сцинтиллятор, который устанавливался за экраном, поглощающим рентгеновские кванты с энергией ~10 кэВ и менее. При больших интенсивностях экспозиционная доза рентгеновского излучения определялась с помощью дозиметров Arrow-Tech, Inc. (Model 138). При энергии квантов 16 кэВ чувствительность дозиметра была на 20% меньше максимальной. При энергии квантов 30 кэВ чувствительность дозиметра достигала максимума и при дальнейшем увеличении энергии рентгеновских квантов до 1 МэВ существенно не изменялась.

Интегральная картина свечения разряда фотографировалась фотоаппаратом SONY A100. Спектры излучения разряда снимались с помощью спектрометров EPP2000C-25 (StellarNet Inc.) и HR4000 (Ocean Optics) с известной спектральной чувствительностью в области от 200 до 850 нм. Электрические сигналы с шунтов, емкостных делителей и коллекторов подавались на осциллограф TDS-3034 (0,3 ГГц, 5 выборки за 1 нс) или DPO-70604 (6 ГГц, 25 выборки за 1 нс).

Экспериментальные результаты

На всех трех установках при изменении межэлектродного зазора и прочих равных условиях можно было получать коронный разряд, имеющий форму конуса (при наносекундной длительности импульса напряжения, генератор № 3) или отдельных струй (генераторы № 1 и 2), диффузный разряд, перемыкающий промежуток, и искровой разряд. Причем при формировании искрового разряда в режиме однократных импульсов и при малых частотах следования импульсов в каждом из импульсов вначале формировался коронный разряд, затем диффузный, а только затем наступало кон-

трагирование разряда. Форма разряда зависела от частоты следования импульсов, числа импульсов в пачке и конструкции электродов. В импульсно-периодическом режиме переход к искровому разряду мог происходить как в течение первого импульса, подаваемого на промежуток (при малых зазорах и(или) больших напряжениях), так и в результате последовательности нескольких импульсов [14].

Фотографии различных режимов коронного разряда приведены ниже. В настоящей статье основное внимание уделяется изучению оптического излучения, а также регистрации рентгеновского излучения и пучка убегающих электронов из коронного разряда. Данные о генерации пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения из диффузных разрядов приведены в работах [13, 15]. Мы предполагаем, что полученные результаты могут быть полезны для объяснения природы лабораторных диффузных разрядов в различных газах, а также природных разрядов в атмосфере Земли.

Внешний вид коронного разряда при длительности импульса напряжения 10 мс и частоте следования импульсов 50 Гц иллюстрирует рис. 3.

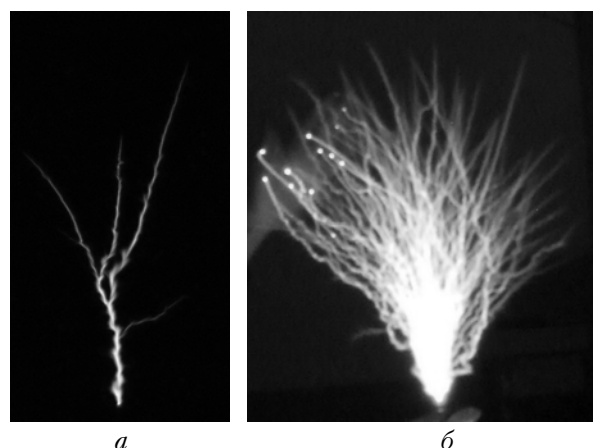


Рис. 3. Интегральные фотографии коронного разряда с экспонированием 1/60 (а) и 1 с (б). Высота фотографии 40 см. Генератор № 1

Интегральные фотографии сделаны для одного импульса напряжения (рис. 3, а) и для пятидесяти (рис. 3, б) соответственно. При подаче одного импульса напряжения формируется одна или несколько диффузных струй (стримеров), которые прорастают от электрода с малым радиусом кривизны. Диаметр диффузных струй у их фронта менее 1 мм. Цвет диффузных струй с импульсами напряжения от генератора № 1 зависел от времени их развития.

Фотографии (рис. 4) сделаны за 250 мкс через 4 и 7 мс после подачи импульса напряжения на промежуток соответственно. На фронте импульса напряжения струи имели синий цвет, а затем наблюдаемый визуально цвет диффузной струи начинает изменяться. Вначале у острия, а затем и по всей ее длине цвет струи, которую в этой фазе развития можно называть «диффузным каналом», становится белым.

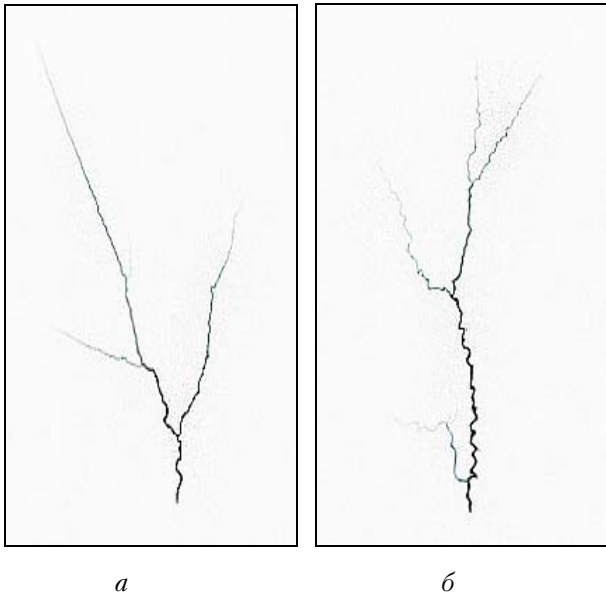


Рис. 4. Динамика свечения коронного разряда в одном импульсе. Каждый кадр (негатив) снят за 250 мкс, задержка между кадрами 3 мс. Задержка между появлением свечения около острия и свечением на кадре (а) 4 мс. Высота фотографии 40 см. Генератор № 1

Кроме того, при уменьшении напряжения на промежутке «канал» начинает изгибаться (рис. 4, б). Диаметр диффузных струй и «каналов» у основания по мере увеличения их длины увеличивается. От боковой поверхности диффузных струй и «каналов» могли начинаться новые диффузные струи (стримеры), но их длина и яркость излучения существенно меньше, чем у основной струи («канала»), рис. 4, а.

Спектр излучения коронного разряда на установке с генератором № 1 показан на рис. 5, а и б. Применение спектрографа HR4000 (Ocean Optics) показало, что в области 200–300 нм только часть полос можно отнести к излучению 2+ системы азота. Другие полосы азота (системы 4+ и Лаймана–Берджа–Гопфилда) не давали заметного вклада в излучение в этой области. Анализ спектра показал, что в области 200–300 нм с традиционно наблюдаемыми полосами второй положительной системы азота появлялось сравнительно интенсивное излучение, определяемое материалом электрода, в данном случае алюминия. Излучение в видимой области спектра имело интенсивность, более чем на порядок меньшую, чем излучение в УФ-области спектра, и на спектрограммах практически не было заметно (рис. 5, а).

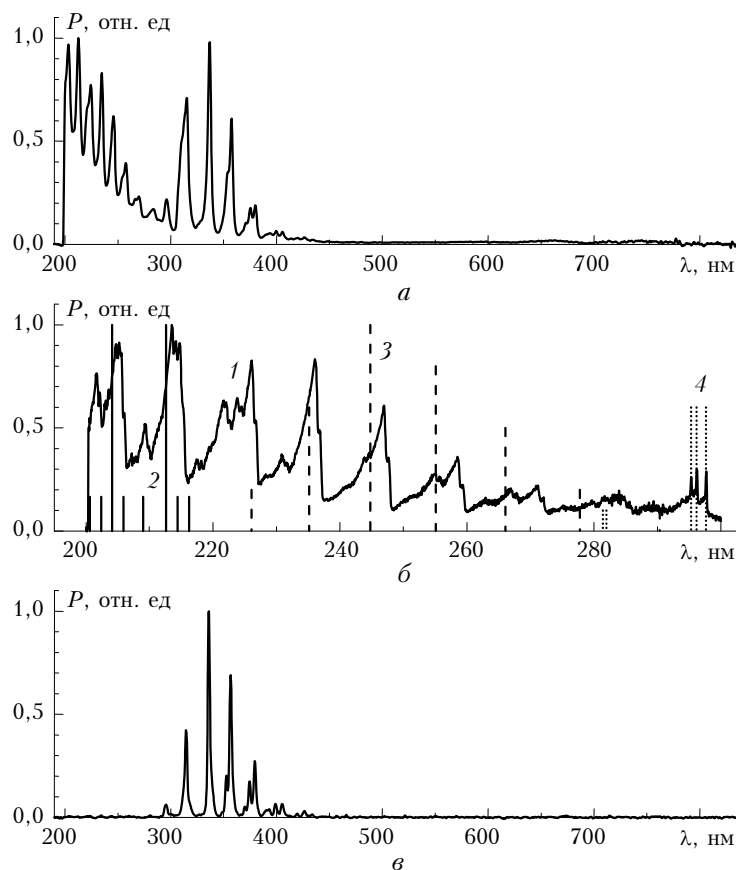


Рис. 5. Спектры излучения коронного разряда на установках с генератором № 1 (а, б) и генератором № 2 (в), снятые спектрометром EPP2000-C (StellarNet Inc.) (а, б) и спектрометром HR4000 (Ocean Optics) (б, спектр 1). Вертикальные линии, штрихи и точки показывают положение и интенсивность при искровом разряде полос Лаймана–Берджа–Гопфилда (2), 4-й положительной (3) и начало 2-й положительной (4) систем азота соответственно (б)

Зарегистрировать рентгеновское излучение на установке с генератором № 1 не удалось, по-видимому, из-за малой энергии рентгеновских квантов, а также из-за их поглощения экраном сцинтиллятора и большого расстояния между сцинтиллятором и областью коронного разряда. Скорость нарастания напряжения на острие при подаче импульсов от генераторов № 1 и 2 была малой ($\sim 10^{11}$ В/с), а это, как известно [6, 13, 15, 16], уменьшает энергию и число рентгеновских квантов.

На установке с генератором № 2 коронный разряд наблюдался в широком диапазоне экспериментальных условий как при частоте следования импульсов 100 кГц, так и в режиме пачек импульсов с различными паузами между пачками. При уменьшении напряжения или увеличении пауз между пачками импульсов формировалась одиночная диффузная струя (стример) диаметром не более 0,2 мм (рис. 6, *а*).

При увеличении амплитуды импульса напряжения и(или) уменьшении паузы между пачками импульсов появлялась вторая диффузная струя и диаметр обеих струй увеличивался (рис. 6, *б*).

Цвет струй при коронном разряде был синий. Так как генератор № 2 имел малое напряжение (до 10 кВ) и длительность отдельного импульса около 1,5 мкс, то диффузная струя не переходила во вторую стадию, когда ее цвет начинал меняться и становился белым. Струи (каналы) белого цвета, как отмечено выше, наблюдались на установке с генератором № 1, при длительности импульса напряжения ~ 10 мс. Спектр излучения коронного разряда на установке с генератором № 2 состоял в основном из полос второй положительной системы азота (см. рис. 5, *в*). Поскольку диффузная струя не переходила во вторую фазу, то полосы материала катода не регистрировались. На установке с генератором № 2 не удалось зарегистрировать рентгеновское излучение, что объясняется низким напряжением генератора (до 10 кВ) и малой энергией рентгеновских квантов при коронном разряде.

На установке с генератором № 3 при одном импульсе напряжения с различных участков катода можно наблюдать диффузный разряд, который заканчивался на аноде, и коронный разряд в виде диффузных струй (рис. 7).

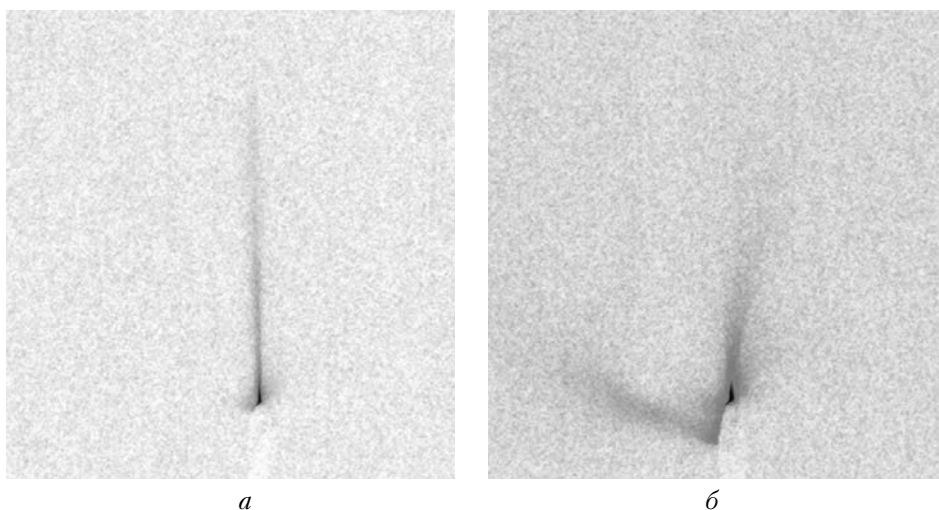


Рис. 6. Фотографии (негативы) коронного разряда с генератором № 2 в воздухе атмосферного давления. Высота фотографий 1 см. Пауза между пачкой импульсов 10 (*а*) и 1 мс (*б*). Длительность пачки разнополярных импульсов амплитудой 10 кВ около 10 мс



Рис. 7. Фотография свечения разряда, полученная через боковое окно на установке с генератором № 3. Ширина фотографии 35 см

Диффузный разряд при межэлектродных зазорах 10–70 мм формировался между катодом и торцевой стенкой камеры. На рис. 7 показано свечение диффузного разряда при межэлектродном зазоре 50 мм и коронного разряда с внутреннего проводника коаксиальной линии. Съемка велась через боковое окно. Интенсивность излучения диффузного разряда между катодом 5 и фольгой 7 (см. рис. 2) увеличивалась при уменьшении межэлектродного зазора d , а объем, занимаемый плотным разрядом, уменьшался. На фотографиях хорошо видны короткие диффузные струи с внутреннего проводника коаксиальной линии, длина которых растет при увеличении межэлектродного промежутка. Диффузные струи были сравнительно равномерно распределены по проводнику 4. При $d = 50$ мм диффузные струи имели длину не более 45 мм (рис. 7) и с уменьшением d их длина уменьшалась. Кроме диффузных струй, во всем объеме коаксиальной линии, как и в работе [16], наблюдалось слабое свечение газа.

На установке с генератором № 3 были зарегистрированы как пучок убегающих электронов, так и рентгеновское излучение. Наибольшая амплитуда тока пучка на коллектор с приемной частью диаметром 20 мм регистрировалась через окно на торце камеры при межэлектродном зазоре 20–30 мм. Плотность тока пучка при этом составляла более $0,5 \text{ А/см}^2$. Как мы уже отмечали, при этих зазорах в промежутке формировался «плотный» диффузный разряд. Данный режим соответствует генерации сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) и описан в работах [13, 15]. Осциллограмма тока пучка приведена на рис. 8, а.

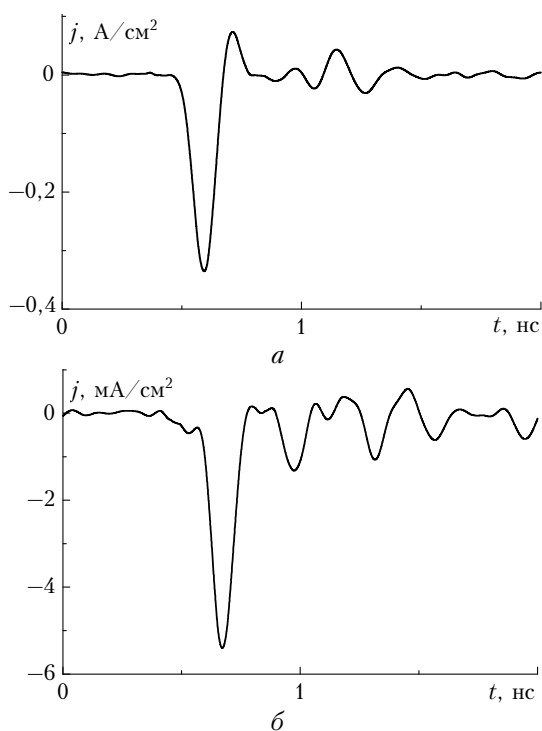


Рис. 8. Осциллограммы тока пучка электронов с коллектора 8 (а) и тока пучка электронов с коллектора 10 (б) при межэлектродном зазоре $d = 50$ мм и напряжении ~ 300 кВ. Генератор № 3

Пучок убегающих электронов был также зарегистрирован из области коронного разряда за окном на боковой стенке коаксиальной линии (рис. 8, б). Энергия электронов в пучке была более 50 кэВ, что позволяло регистрировать пучок за двумя Al-фольгами толщиной по 15 мкм. Плотность тока пучка из области коронного разряда была на 3 порядка меньше плотности тока пучка в режиме СЛЭП за окном на торце разрядной камеры. Было установлено, что длительность импульса тока пучка из области коронного разряда мала (не более 100 пс на полувысоте).

Интенсивность и энергия квантов рентгеновского излучения из газового диода зависели от формы разряда и места положения дозиметра. Экспозиционная доза рентгеновского излучения при межэлектродном зазоре 30 мм при установке дозиметра на торце разрядной камеры за медной фольгой толщиной 20 мкм составила $\sim 0,1$ мР за импульс. При регистрации рентгеновского излучения из коронного разряда экспозиционная доза рентгеновского излучения уменьшалась, как и плотность тока пучка, на несколько порядков. При использовании для регистрации рентгеновского излучения сцинтиллятора и ФЭУ необходимо было на установке с генератором № 3 устанавливать дополнительные экраны для ослабления рентгеновского излучения.

Механизм генерации рентгеновского излучения в воздухе

За генерацию рентгеновского излучения в атмосферном воздухе ответственны два основных процесса. Во-первых, это тормозное излучение электронов на ядрах атомов азота/кислорода. Во-вторых, это ударная ионизация внутренней электронной оболочки этих атомов (K -оболочек), приводящая к генерации линейчатого спектра характеристического излучения за счет каскадного перехода электронов с внешних энергетических уровней на образовавшуюся вакансию.

Характерная величина интегрального сечения тормозного излучения быстрых электронов σ_{en} , имеющих нерелятивистскую кинетическую энергию $\varepsilon = mv_0^2/2$, на ядре атома с зарядом Ze с генерацией квантов в диапазоне $\hbar\omega > \hbar\omega_{\min}$ рассчитана в борновском приближении ($2\hbar v_0/Zc \gg 1$) в [17, § 70]:

$$\sigma_{en} \approx \frac{8e^2}{3\hbar c^3} \left(\frac{Ze^2}{mv_0} \right)^2 \ln^2 \left(\frac{mv_0^3}{Ze^2 \omega_{\min}} \right), \quad (1)$$

где c – скорость света. Полагая минимальную энергию квантов на уровне $\hbar\omega_{\min} = 300$ эВ, для энергии электрона 10 кэВ имеем из (1) оценку сечения тормозного излучения на ядрах кислорода $\sim 5 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2$. Сечение тормозного излучения растет $\sim Z^2$.

Оценим теперь сечение, описывающее генерацию характеристического излучения при ионизации внутренней оболочки атомов (K -оболочки). Для

оценок воспользуемся приближенными теоретическими формулами для сечения ионизации K -оболочки из работы [18]. В этой работе полное сечение σ_Z рассчитывалось как сумма двух независимых взаимодействий: 1) фотоионизация атома при пролете мимо K -оболочки быстрого электрона, когда импульс электрического поля пролетающего электрона содержит в спектре гармоники с частотами, превышающими пороговую энергию ионизации E_Z ; 2) упругое рассеяние быстрого электрона на одном из двух K -электронов с сообщением последнему энергии, достаточной для вылета из атома. В [18] показано, что суммарное сечение ионизации σ_Z почти до порога реакции (примерно до $1,5E_Z$) неплохо аппроксимируется выражением

$$\sigma_Z(E) \approx \frac{10^{-24} \text{ см}^2}{I_Z E (E + 2)} \left\{ 2 + (E + 1)^2 \ln \sqrt{\frac{E(E + 1)}{I_Z}} - \frac{I_Z}{E} \left[(E + 2)^2 + 2(2E + 1) \ln \frac{E}{I_Z} - 2 \right] \right\}, \quad (2)$$

где $I_Z = E_Z/mc^2$; $E = mv_0^2/2mc^2$. Основная зависимость сечения σ_Z от атомного номера Z содержится в первом множителе $\sim 1/Z^2$.

Как видно, тенденции зависимости у тормозного и характеристического излучения от атомного номера Z противоположны.

Энергию ионизации K -оболочки E_Z возьмем из справочника [19]: для кислорода и азота $E_8 \cong 537$ эВ и $E_7 \cong 405$ эВ соответственно. Для электронов с кинетической энергией 10 кэВ имеем характерную величину сечения (2) для кислорода $\sim 5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-2}$, что на 3 порядка больше сечения тормозного излучения (1). При таком сечении средняя длина пробега, на которой произойдет ионизация K -оболочки атома кислорода быстрым электроном с энергией 10 кэВ, имеет порядок ~ 4 мм. Так как при $E \ll 1$ сечение $\sigma_Z \sim 1/E$, то ионизация более медленными электронами будет происходить чаще. Фактически, потери энергии электронов с энергией в единицы кэВ в основном связаны именно с K -ионизацией азота и кислорода. Интенсивностью же тормозного излучения быстрых электронов на ядрах атомов можно пренебречь.

Этот расчет доказывает, что в сантиметровых разрядных промежутках поток убегающих электронов возбуждает характеристическое излучение атомов азота и кислорода. По данным [19], энергия квантов K -излучения $\hbar\omega_K$ кислорода и азота равна 525 и 390 эВ соответственно.

Основным процессом, приводящим к поглощению мягкого рентгеновского излучения в объеме газа, является фотоионизация атомов. Для оценок длины пробега квантов характеристического излучения $\hbar\omega$ в воздухе используем приближенное выражение для сечения фотоионизации K -оболочки атома [20, с. 42]:

$$\sigma_{K_{ion}} \approx \frac{\sigma_{K_0}}{Z^2} \left(\frac{E_Z}{\hbar\omega} \right)^3, \quad \hbar\omega \geq E_Z, \quad (3)$$

где $\sigma_{K_0} = 6,5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ — универсальная константа. Это сечение достигает максимального значения при пороговой энергии E_Z и быстро падает с ростом энергии кванта $\hbar\omega$, причем вероятность фотоионизации с K -оболочки во много раз превышает сечение фотоионизации с энергетических уровней валентных электронов.

Оценим по формуле (3) сечение фотоионизации K -оболочки атома азота квантами характеристического излучения кислорода. Получим для $\hbar\omega_K = 525$ эВ и $E_7 = 405$ эВ сечение $\sigma_{K_{ion}} \cong 6 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$. Средняя длина пробега такого фотона в воздухе атмосферного давления (с учетом парциальной концентрации молекул азота 80%) составит ~ 4 мм. Поглощение рентгеновских квантов с выбиванием вторичного электрона с энергией ~ 120 эВ происходит, хотя и неподалеку от места их генерации, но все же достаточно далеко от вторичных электронов каскада, появившихся за счет ударной ионизации молекул воздуха непосредственно при столкновении быстрых электронов. Поскольку вторичные электроны в сильном электрическом поле на предпробойной стадии разряда могут являться центрами новых электронных лавин, описанный выше процесс фотоионизации азота рентгеновскими квантами должен приводить к формированию преимущественно диффузной формы разряда.

Обсуждение результатов

Диффузные формы разряда и излучение 2+ системы азота, которое характерно для таких форм разряда, наблюдались как в условиях регистрации жесткого рентгеновского излучения, так и в его отсутствие. Это указывает на наличие источника предьонизации в обоих случаях. Поэтому можно полагать, что и при малых напряжениях генератора, а также при большой длительности фронта импульса напряжения убегающие электроны приводят к генерации мягкого характеристического излучения азота и кислорода с энергией квантов $\sim 0,5$ кэВ и в тех случаях, когда имеющаяся система регистрации его не фиксировала. Известно, что за счет концентрации электрического поля на электродах с малым радиусом кривизны и на головке стримера, а также на фронте диффузной струи режим убегания для части электронов достигается при сравнительно малых средних напряженностях поля (см., например, [21]). Это объясняет быстрое прорастание диффузных каналов в неоднородном электрическом поле при малых амплитудах напряжения и большой длительности импульса.

Отметим, что сечение генерации характеристических рентгеновских квантов быстрыми (~ 10 кэВ) электронами имеет примерно ту же величину, что

и сечение генерации медленных (~120 эВ) вторичных электронов квантами излучения. Поэтому характеристическое рентгеновское излучение, которое в отличие от направленного потока быстрых электронов практически изотропно, может обеспечить эффективную фотоионизацию газа вблизи области локально усиленного поля при любой полярности напряжения на острейшем электроде и на головке стримера.

Один из важных вопросов при определении механизма формирования молнии – это определение того, за счет каких процессов происходит продвижение лидера при пробое длинных промежутков. Из представленных результатов следует, что при коронном разряде генерируется пучок убегающих электронов. Убегающие электроны были зарегистрированы на значительном расстоянии от области с яркосветящейся плазмой коронного разряда и имели энергию более 50 кэВ. Мы предполагаем, что при прорастании лидера линейной молнии также генерируются убегающие электроны, которые приводят к появлению как тормозного, так и характеристического излучения. По-видимому, плавное движение положительного лидера молнии [3] обусловлено преимущественной предыонизацией воздуха перед головкой лидера характеристическим рентгеновским излучением. Скачкообразное движение отрицательного лидера молнии [3] можно объяснить предыонизацией области перед головкой лидера убегающими электронами, которые генерируются в виде отдельных коротких импульсов.

Заключение

Проведенные исследования показали, что в широком диапазоне экспериментальных условий диффузный коронный разряд формируется в воздухе атмосферного давления. Формирование диффузного коронного разряда обусловлено генерацией убегающих электронов и рентгеновского излучения, в том числе характеристического. Наличие характеристического излучения, роль которого определена в результате моделирования, объясняет формирование диффузных струй при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны. Диффузные струи синего цвета (стримеры) формируются при коротких длительностях импульсов и малых удельных энергокладах. Из этих струй, в основном, регистрируется излучение второй положительной системы азота. При увеличении длительности импульса напряжения и удельного энергоклада визуально цвет струй меняется на белый и их диаметр увеличивается. В этих условиях спектр оптического излучения изменяется, и в УФ-области спектра вместе с полосами второй положительной системы азота наблюдались полосы, которые определяются материалом катода.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», ГК № 02.740.11.0562.

1. *Барри Дж.* Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983. 288 с.
2. *Стаханов И.П.* О физической природе шаровой молнии. М.: Научный мир, 1996. 264 с.
3. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
4. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 736 с.
5. *Akishev Yu.S., Grushin M.E., Deryugin A.A., Napatovich A.P., Pan'kin M.V., Trushkin N.I.* Self-oscillations of a positive corona in nitrogen // *J. Phys. D.* 1999. V. 32, N 18. P. 2399–2409.
6. *Братчиков В.В., Гагаринов К.А., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И.* О рентгеновском излучении при объемных разрядах в воздухе атмосферного давления // *Ж. техн. физ.* 2007. Т. 77, вып. 7. С. 34–42.
7. *Dwyer J.R., Saleh Z., Rassoul H.K., Concha D., Rahman M., Cooray V., Jerauld J., Uman M.A., Rakov V.A.* A study of X-ray emission from laboratory sparks in air at atmospheric pressure // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, D23207, doi:10.1029/2008JD010315.
8. *Nguyen C.V., van Deursen A.P.J., Elbert U.M.* Multiple x-ray bursts from long discharges in air // *J. Phys. D.* 2008. V. 41, N 23. 234012 (7 p.).
9. *Афанасьев С.Б., Лавренко Д.С., Петрушенко И.Н., Стешков Ю.К.* Некоторые особенности коронного разряда в воздухе // *Ж. техн. физ.* 2008. Т. 78, вып. 7. С. 30–34.
10. *Rahman M., Cooray V., Ahmad N.A., Nyberg J., Rakov V.A., Sharma S.* X-rays from 80-cm long sparks in air // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L06805, doi:10.1029/2007GL032678.
11. *Pai D.Z., Stancu G.D., Lacoste D.A., Laux C.O.* Nanosecond repetitively pulsed discharges in air at atmospheric pressure – the glow regime // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2009. V. 18. 045030 (7 p.).
12. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Kostyrya I.D., Jiang H., Xu R., Rybka D.V., Yan P.* Generation of Runaway Electrons and X-rays in Repetitive Nanosecond Pulse Corona Discharge in Atmospheric Pressure Air // *Appl. Phys. Express.* 2011. V. 4. 066001 (3 p.).
13. *Tarasenko V.F., Bakht E.H., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V.* Generation of supershort avalanche electron beams and formation of diffuse discharges in different gases at high pressure // *Plasma Devices and Operation.* 2008. V. 16, N 4. P. 267–298.
14. *Shao T., Zhang C., Niu Z., Yan P., Tarasenko V.F., Bakht E.Kh., Burachenko A.G., Shut'ko Y.V.* Diffuse discharge, runaway electron, and x-ray in atmospheric pressure air in an inhomogeneous electrical field in repetitive pulsed modes // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 98. 021503 (3 p.).
15. *Тарасенко В.Ф.* Параметры сверхкороткого лавинного электронного пучка, генерируемого в воздухе атмосферного давления, и их измерение // *Физ. плазмы.* 2011. Т. 37, № 5. С. 444–457.
16. *Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф.* Рентгеновское излучение из объемного слаботочного разряда в воздухе атмосферного давления // *Письма в ЖТФ.* 2007. Т. 33, вып. 10. С. 41–48.
17. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. М.: Наука, 1973. 504 с.

18. *Kolbenstvedt H.* Simple Theory for K-ionization by Relativistic Electrons // *J. Appl. Phys.* 1967. V. 38, N 12. P. 4785–4787.
19. *Физические величины* / Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 961 с.
20. *Лозаннский Э.Д., Фурсов О.Б.* Теория искры. М.: Атомиздат, 1975. 272 с.
21. *Kunhardt E.E., Byszewski W.W.* Development of overvoltage breakdown at high gas pressure // *Phys. Rev. A.* 1980. V. 21, N 6. P. 2069–2077.

A.V. Kozhrev, V.Yu. Kozhevnikov, I.D. Kostyrya, D.V. Rybka, V.F. Tarasenko, D.V. Schitz. **Radiation of diffuse corona discharge in atmosphere-pressured air.**

In the atmosphere-pressured air optical and X-radiation of corona discharge is investigated. Spectra of optical radiation in range 200–850 nm are obtained under various parameters of voltage pulse. It was shown that by increasing the voltage pulse, the corona discharge mode changes so that the discharge becomes a source of UV radiation not only of nitrogen 2+ bands, but the bands from cathode matter as well. Also it was shown that formation of diffusive corona discharges in nonuniform electric field under high pressures is conditioned by fast electrons and X-rays generation. It was determined that fast electrons from atmospheric discharges generate K radiation quanta with energies of 525 eV. Calculations show that radiation quanta may effectively initiate new electrons near strong field area. This process explains the formation of diffusive discharge types for positive polarity electrode with small radius of curvature under the atmospheric pressure as well as fast movement cathode streamer.