

ДОПРОБОЙНАЯ ФАЗА АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЯДОВ

А. В. Агафонов, А. В. Огинов, К. В. Шпаков

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

В разрядах в воздухе атмосферного давления при максимальном напряжении на промежутке от 0,8 до 1,2 МВ зарегистрировано импульсное рентгеновское излучение с энергией квантов более 5 кэВ в допробойный момент времени. Область генерации ультрафиолетового и рентгеновского излучения локализована с помощью коллимирующих и времяразрешающих диагностик. В ближней ультрафиолетовой области максимум интенсивности излучения соответствует моменту генерации рентгеновского излучения.

In atmospheric pressure discharge in air at maximal voltage from 0.8 to 1.2 MV the pulsed X-ray radiation with quanta energy higher than 5 keV is registered in prebreakdown phase. Ultraviolet and X-ray generating region is localized using collimated and time-resolved diagnostics. In near ultraviolet range the maximum of radiation intensity corresponds to X-ray generation instant.

PACS: 52.80.-s

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающий интерес к явлению убегания электронов в атмосфере на протяжении последнего десятилетия обусловлен наблюдениями сильного рентгеновского и гамма-излучения во время гроз как наземными детекторами, так и детекторами, установленными на шарах-зондах и спутниках [1, 2]. Кроме того, имеются данные о наблюдениях свечения атмосферы Земли в подобных условиях в ультрафиолетовой области спектра [3]. Не менее важными являются также наблюдения жесткого рентгеновского и гамма-излучений в обычных лабораторных высоковольтных разрядах [4–7]. Такие излучения с энергией квантов, превышающей 300 кэВ [4], могут иметь серьезное влияние на окружающую среду. Однако на настоящий момент физика формирования убегающих электронов в воздухе и их ускорение до конца не ясны.

Явление убегания электронов в газовых разрядах возникает в сильных электрических полях. Для перехода в состояние непрерывного ускорения (убегания) электрон должен увеличивать кинетическую энергию в поле больше, чем он теряет на ионизацию, возбуждение и диссоциацию молекул в воздухе: $eEl > \varepsilon_{\text{ном}}$, где $l \sim (\sigma n)^{-1}$ — длина свободного пробега электрона в воздухе плотностью n и сечением неупругих столкновений σ ; $\varepsilon_{\text{ном}}$ — эффективная потеря энергии на длине свободного пробега. Подробные вычисления [8, 9] дают для пороговой напряженности электрического поля в воздухе при нормальном давлении величину около $E_{\text{RW}} \sim 320$ кВ/см. С одной стороны, в таком поле все электроны в воздухе будут непрерывно ускоряться или убегать. С другой стороны, такое поле очень велико — оно очень быстро спадает из-за возникающего при этом коронного

эффекта. Максимальная пробойная прочность в атмосфере около $E_{th} \sim 29$ кВ/см [10], типичная же напряженность поля в грозовой атмосфере около $E_{td} \sim 1$ кВ/см [1, 2]. Тем не менее наличие убегающих электронов в газовых разрядах при определенных условиях не подлежит сомнению [1–2, 4–7]. Совместный эффект сильного электрического поля и преднагретой плазмы может ускорить электроны в воздухе при меньших электрических полях. Сечение неупругих столкновений уменьшается с ростом энергии электрона как $\sigma \sim \varepsilon^{-1}$, и пороговое поле E_{RW} для электронов с энергией, например, 1 кэВ уже существенно меньше, около $E_{RW} \sim 30$ кВ/см [9].

В настоящей работе изучены эффекты убегания электронов в импульсных высоковольтных разрядах с помощью регистрации рентгеновского излучения, его корреляции с излучением в ближнем ультрафиолетовом диапазоне спектра и электрофизическими параметрами разряда.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторный эксперимент проводился на установке ЭРГ ($U_{max} \approx 1,2$ МВ, $I_{max} \approx 12$ кА) [11], состоящей из маслонаполненного генератора импульсных напряжений типа Аркадьева–Маркса, проходного высоковольтного изолятора с выходом на воздух и осевого разрядного промежутка. Электроды с радиусом скругления 4,5–45 мм устанавливались на расстоянии 500–750 мм друг от друга. Высоковольтным электродом являлся расположенный на оси катод, заземленный анод был соединен с генератором импульсных напряжений с помощью коаксиального цилиндрического токопровода. Измерения электрофизических параметров разряда обеспечивались резистивным и емкостным делителями напряжения, шунтами тока и поясами Роговского. Импульс напряжения имеет фронт нарастания $T \sim 150$ –200 нс, общая длительность импульса до пробоя — около 1 мкс.

Для регистрации рентгеновского излучения применялись детекторы на основе пластиковых сцинтилляторов и ФЭУ, защищенных от наводок. Динамика формирования канала разряда регистрировалась пятикадровой ЭОП-камерой с 7-нс экспозицией. Интегральная съемка в видимом диапазоне спектра велась с помощью аксиальной и угловой цифровых камер. Для регистрации ближнего ультрафиолетового и видимого излучений с пространственной локализацией применялась сборка быстрых ФЭУ с системой оптической фильтрации, коллимации и оптоволоконного ввода.

2. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (РИ) И ПРЕДЫМПУЛЬС ТОКА

Типичные осциллограммы напряжения и тока разряда в описанной конфигурации установки приведены на рис. 1, *а, б*.

Вероятность возникновения рентгеновского излучения достаточно высока: более 50% разрядов с напряжением более 800 кВ сопровождались импульсами РИ. Рентгеновское излучение, являющееся тормозным излучением убегающих электронов, всегда возникает до основного пробоя. Импульс рентгеновского излучения согласован с предимпульсом тока разряда. Как видно из осциллограмм на рис. 1, *а, б*, в момент генерации рентгеновского излучения напряжение составляет около 550 кВ. Характерному моменту возникновения импульса РИ в предпробойной стадии соответствует пичок на осциллограмме тока

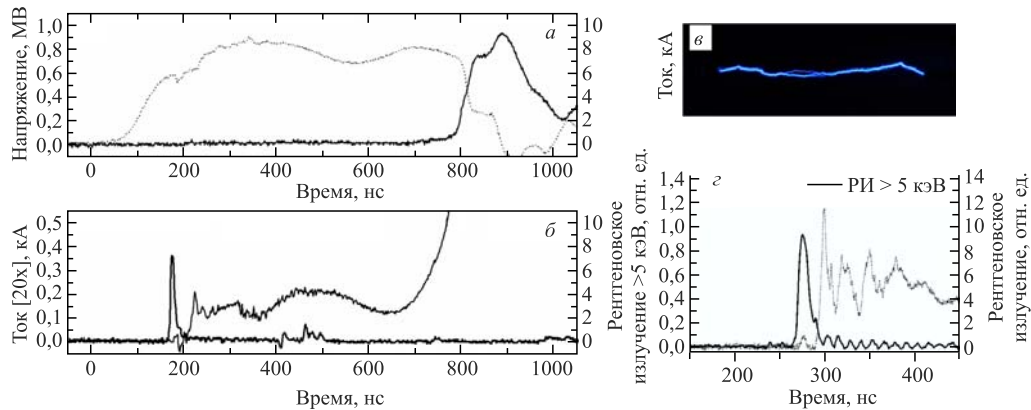


Рис. 1. *а, б*) Типичные осциллограммы напряжения, тока и РИ разряда; *в, г*) импульс РИ и предимпульс тока

за $\sim 15\text{--}20$ нс до основного переднего фронта предимпульса тока (рис. 1, *г*). Амплитуда пика составляет 5–10 % амплитуды последующего нарастания предимпульса тока. Подобный характер тока может быть обусловлен пробоем на убегающих электронах, когда пикочок соответствует току убегающих электронов, а следующее за ним нарастание тока определяется порожденными низкоэнергетичными электронами. С нарастанием напряжения ГИН напряжение в момент пробоя также растет, но не существенно. При этом импульс рентгеновского излучения наблюдается почти при том же напряжении. Однако амплитуда рентгеновского сигнала меняется более существенно. Такая зависимость может быть связана со скоростью нарастания напряжения [7].

Спектр рентгеновского излучения был оценен по методу поглощающих фильтров. Использовались Al- и Pb-фильтры толщиной от 50 мкм до 3 мм, закрывающие обращенный к промежутку торец сцинтиллятора. По наблюдаемому уменьшению сигналов рентгеновского излучения с толщиной фильтра определен приблизительно экспоненциальный характер распределения квантов рентгеновского излучения по энергии. Основная часть квантов имеет энергию в единицы килоэлектронвольт. Регистрировалось небольшое количество квантов с энергией больше 150–200 кэВ. И лишь единичные кванты оказываются на уровне приложенной разности потенциалов, что предполагает расположение источника убегающих электронов вблизи отрицательного электрода.

3. ИНТЕГРАЛЬНАЯ И КАДРОВАЯ ЭОП-СЪЕМКА РАЗРЯДА

Интегральная форма разряда обычно имеет изогнутую форму (рис. 1, *в*), убедительно показывающую то, что быстрые электроны, распространяющиеся прямолинейно, не могут ускоряться в плазме пробоя. Устойчиво наблюдается смыкание противоположных стримеров, обеспечивающее контакт между электродами перед основным пробоем. Данные интегральной съемки развития разряда с принудительным выключением электрического поля показали (рис. 2), что первыми появляются стримеры с катода, а прорастающие с анода стримеры появляются позже и за малое (порядка десятков наносекунд) время

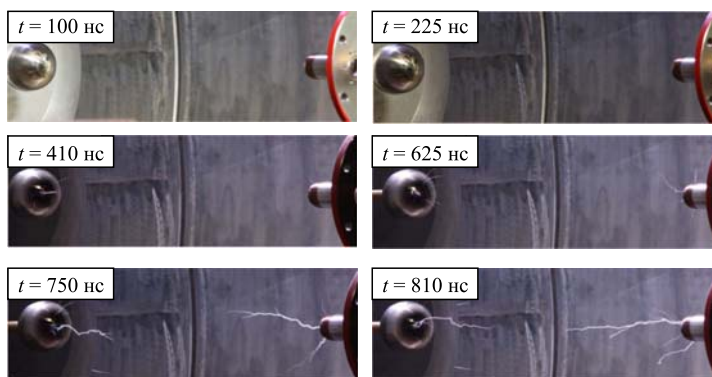


Рис. 2. Интегральная съемка развития разряда с принудительным выключением электрического поля в промежутке 600 мм в различные моменты времени относительно начала нарастания поля



Рис. 3. ЭОП-снимки начальной стадии развития разряда

набирают скорость до 10^8 см/с, в то время как катодные стримеры большую часть промежутка проходят со скоростью, достигающей всего около $5 \cdot 10^6$ см/с. При этом встреча происходит примерно посередине промежутка.

ЭОП-съемка начальной стадии развития разряда с экспозицией 7 нс показала структуру прорастающей головки канала (рис. 3). Растущий канал разряда неравномерно светится по своей длине. Наиболее яркой областью растущего канала является своеобразная «головка» округлой формы с диаметром ~ 1 см. Со стороны, обращенной к аноду, видно менее яркое «острие» длиной 1–8 см. Свечение канала разряда продолжается довольно длительное (до нескольких микросекунд) время после прохождения основного тока. Отмечены также диффузные светящиеся области вокруг основного токового канала на поздних стадиях разряда тока. Также ЭОП-съемка позволила уточнить динамику катодных стримеров: непосредственно перед смыканием с анодными стримерами их скорость резко возрастает до скоростей, характерных для анодных стримеров.

4. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ УФ

Из осциллограмм (рис. 4, б) видно, что самый ранний импульс УФ-излучения возникает в прикатодной области. При сканировании пространства коллиматором вдоль оси разрядного промежутка по мере удаления от катода излучение в поле зрения датчика возникает позже по времени, а амплитуда сигнала уменьшается. При этом в прианодной области наблюдается второй максимум УФ-излучения, фронт нарастания которого отстоит от фронта первого на 100–120 нс, что хорошо согласуется с визуализирующими

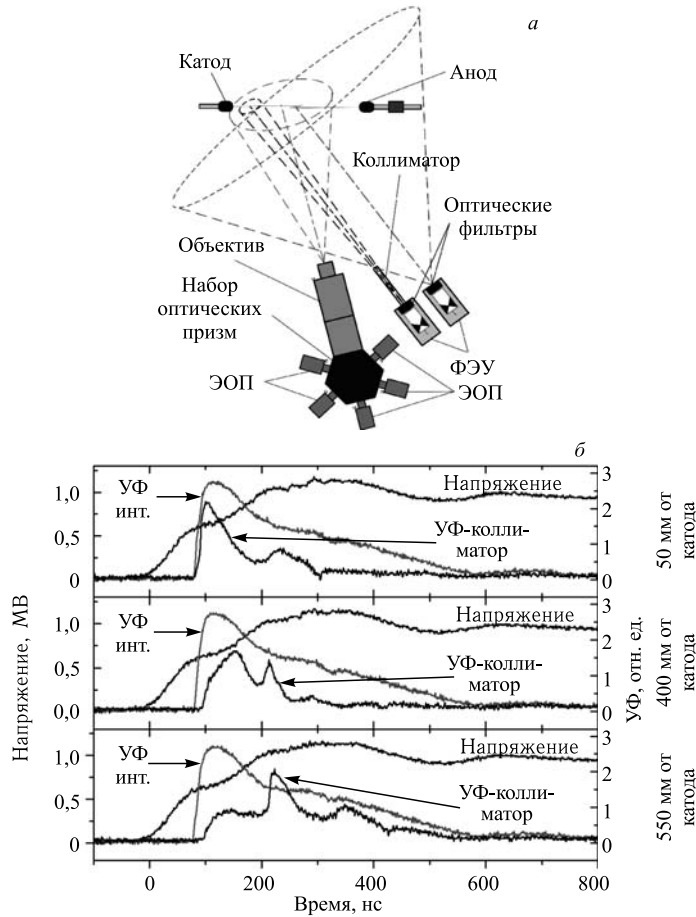


Рис. 4. а) Схема диагностик; б) УФ-излучение на разном расстоянии от электродов

диагностиками. Также следует отметить, что УФ-излучение (интегральное по всему разрядному промежутку) регистрируется через 80 нс после начала подъема напряжения на промежутке (само напряжение на катоде в этот момент составляет 580–600 кВ), а первые различимые в видимом свете стримеры регистрируются через 90–150 нс после фронта УФ. Оценки скоростей перемещения прикатодной и прианодной областей УФ-свечения дают величины, как минимум на порядок превосходящие значения, полученные для скоростей стримерных каналов в видимой области [12]. Скорости катодных областей свечения составляют от $2 \cdot 10^8$ см/с через 100 нс после начала подъема напряжения на зазоре и за 50 нс увеличиваются до $8 \cdot 10^8$ см/с. Для анодных областей начальная скорость составляет 10^9 см/с (стримеры имеют длину ~ 50 мм) через 220 нс после начала подъема напряжения и падает до $5 \cdot 10^8$ см/с за 40 нс. Таким образом, УФ-излучение связано с процессом возникновения стримеров или с процессом, непосредственно предшествующим развитию стримеров. Причем источник УФ обусловлен процессами в области головки стримера более быстрыми, чем рост самого канала стримера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для допробойной фазы разряда в диапазоне межэлектродных промежутков 0–750 мм, напряжений 0,5–1,2 МВ, радиусов электродов 8–45 мм можно отметить, что: 1) характерному моменту возникновения импульса РИ в предпробойной стадии соответствует пик на осциллограмме тока за ~ 15 –20 нс до основного фронта предимпульса тока; амплитуда пика составляет 5–10 % амплитуды последующего нарастания предимпульса тока; подобный характер тока может быть обусловлен пробоем на убегающих электронах; 2) момент генерации первого импульса РИ приходится на максимум ближнего УФ-излучения; нарастание генерации ближнего ультрафиолета 240–400 нм происходит за время ~ 20 нс; длительность всего УФ-импульса превышает длительность рентгеновских импульсов; временной ход ультрафиолета не совпадает с таковым для видимого света; 3) скорости областей УФ-свечения в стримерной зоне составляют от $2 \cdot 10^8$ до 10^9 см/с, т. е. на порядок и более превосходят характерные скорости роста стримерного канала; 4) растущий канал разряда имеет наиболее яркой область в виде округлой «головки» с диаметром ~ 1 см с сужающимся к аноду менее ярким «острием».

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (10-08-01283).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dwyer J. R. *et al.* Energetic Radiation Produced during Rocket-Triggered Lightning // *Science*. 2003. V. 299. P. 694.
2. Tsuchiya H. *et al.* Observation of an Energetic Radiation Burst from Mountain-Top Thunderclouds // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 102. P. 255003.
3. Garipov G. K. *et al.* Ultraviolet Flashes in the Equatorial Region of the Earth // *JETP Lett.* 2005. V. 84. P. 185–187.
4. Dwyer J. R. *et al.* A Study of X-ray Emission from Laboratory Sparks in Air at Atmospheric Pressure // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. D23207.
5. Nguyen C. V., van Deursen A. P. J., Ebert U. Multiple X-ray Bursts from Long Discharges in Air // *J. Phys. D.* 2008. V. 41. P. 234012.
6. Rahman M. *et al.* X Rays from 80-cm Long Sparks in Air // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. P. L06805.
7. March V., Montanya J. Influence of the Voltage-Time Derivative in X-ray Emission from Laboratory Sparks // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. P. L19801.
8. Gurevich A. V. On the Theory of Runaway Electrons // *Sov. Phys. JETP. Engl. Transl.* 1961. V. 12(5). P. 904–912.
9. Gurevich A. V., Zybin K. P. Runaway Breakdown and Electric Discharges in Thunderstorms // *Phys. Usp.* 2001. V. 44. P. 1119–1140.
10. Базелян Е. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
11. Огинов А. В. и др. Рентгеновское и ультрафиолетовое излучение фаз разряда длинной искры // Тр. науч. сессии НИЯУ МИФИ-2010. М.: МИФИ, 2010. Т. 2. С. 92–95.
12. Oreshkin E. V. *et al.* Bremsstrahlung Radiation of Fast Electrons in Long Air Gaps // *Proc. of 16th Intern. Symp. on High Current Electronics.* 2010. P. 172–175.