

Пространственно-временная локализация областей эмиссии рентгеновского излучения в протяженном высоковольтном разряде

Е. В. Паркевич¹⁾, К. В. Шпаков⁺, А. А. Родионов⁺, И. С. Байдин⁺, Я. К. Болотов^{+,*}, А. В. Огинов⁺

⁺Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

^{*}Московский физико-технический институт, 141700 Долгопрудный, Россия

Поступила в редакцию 20 мая 2024 г.

После переработки 20 июня 2024 г.

Принята к публикации 27 июня 2024 г.

Впервые проведены синхронные пространственно-временные измерения эмиссий жесткого рентгеновского излучения во время развития высоковольтного разряда при напряжениях ~ 1 МВ в полуметровых открытых воздушных промежутках. С использованием группы сцинтилляционных детекторов со свинцовыми диафрагмами и наносекундной фотосъемки разряда в собственном свечении показано, что рентгеновское излучение появляется в стадии развития разряда, когда во всем разрядном промежутке формируется множество яркосветящихся плазменных каналов и протекает ток разряда амплитудой в сотни ампер. Показано, что эмиссия рентгеновского излучения (кванты с энергией > 5 кэВ) может начинаться практически синхронно во всем разрядном промежутке, включая области катода и анода, прикатодную и прианодную области, а также середину разрядного промежутка. Получены статистические распределения суммарной мощности и количества наблюдений вспышек рентгеновского излучения вдоль разрядного промежутка.

DOI: 10.31857/S1234567824140052, EDN: SDWLYH

Явление генерации жесткого рентгеновского излучения протяженными высоковольтными разрядами занимает важное место в современной физике газового разряда [1]. Наблюдение эмиссий рентгеновского излучения в диапазоне от малых до больших энергий было зарегистрировано как при иницировании разрядов в сравнительно коротких (от единиц мм до порядка 10 см) разрядных промежутках [2–8], так и в промежутках, достигающих метра и более [9–12]. Отдельно стоит отметить экспериментальные данные, полученные во время грозových явлений в атмосфере, когда регистрировались вспышки рентгеновского излучения от натуральных молний [13–15]. Предполагается, что физические процессы, связанные с генерацией жесткого рентгеновского излучения, поддаются масштабированию, и поэтому могут быть детально исследованы в условиях лабораторного эксперимента. На сегодня в данном направлении научной деятельности уже получено много результатов: раскрыты временные корреляции эмиссий рентгеновского излучения с другими типами электромагнитного излучения [16, 17], установлены энергетический спектр и пространственное распределение квантов рентгеновского излучения [9, 10, 12, 18, 19], определена связь эмиссий рентгеновского излучения с ди-

намикой разряда [20, 21] и т.д. Рассмотрены различные концепции процессов, способных создавать условия для генерации жесткого рентгеновского излучения в газоразрядной среде. Созданы модели соответствующих процессов на основе лавин убегающих электронов [22, 23], смыкающихся стримеров [24–26], быстрых вторичных волн ионизации [27, 28], распространяющихся по поверхности плазменных каналов различной формы. В ряде работ [3, 21] отмечалось, что генерация рентгеновского излучения наблюдается не в фазе распространения стримерных каналов, а уже после перемыкания промежутка стримерами и приходится на стадию развития разряда, когда во всем промежутке возникает либо диффузный разряд, либо большое количество плазменных каналов. Напротив, в работах [9–11] утверждалось, что генерация рентгеновского излучения наблюдается в разрядном промежутке исключительно в стадии смыкания отрицательных и положительных стримерных корон. К сожалению, однозначной картины всех явлений, так или иначе сопровождающих процесс генерации жесткого рентгеновского излучения во время развития протяженных высоковольтных разрядов, экспериментально до сих пор установлено не было. Обусловлено это, с одной стороны, принципиальной сложностью самих явлений, которые вдоба-

¹⁾e-mail: parkevich@phystech.edu

вок могут реализовываться одновременно в условиях эксперимента. С другой стороны, сказывается отсутствие экспериментальных данных по наблюдению с высоким временным (на уровне ~ 1 нс) и пространственным разрешением эволюции разряда в стадии генерации рентгеновского излучения при одновременном установлении пространственных зон разряда, ответственных за эмиссию такого излучения.

В данной работе на примере лабораторного разряда, инициированного при напряжениях 1 МВ в полуметровых открытых воздушных промежутках, проведена синхронная пространственно-временная локализация областей генерации рентгеновского излучения вдоль всего разрядного промежутка. Результаты работы позволили раскрыть сложный характер развития протяженного высоковольтного разряда в стадии генерации жесткого рентгеновского излучения и одновременно установить пространственные зоны разряда, связанные с эмиссией данного типа электромагнитного излучения.

В работе использовалась большая высоковольтная установка, подробно описанная в [29]. Установка позволяет получать импульсы напряжения амплитудой до 1 МВ с фронтом ≈ 200 нс и длительностью ~ 1 мкс. В проводимых исследованиях использовались импульсы отрицательной полярности. Высоковольтный импульс прикладывался к открытому воздушному промежутку длиной ≈ 55 см (рис. 1). Высоковольтный электрод (катод) представляет собой обратный конус, по центру которого вставлена игла. Диаметр скругленной кромки конуса составляет ≈ 36 см. Напротив катода установлен полусферический сетчатый анод, закрепленный на обратный токопровод. В экспериментах измерялось напряжение импульса, подаваемого на разрядный промежуток, и ток с анодного шунта, установленного между анодом и его креплением к обратному токопроводу (рис. 1). Характеристики электрофизических датчиков позволяли измерять ток и напряжение разряда с разрешением не хуже нескольких наносекунд. Динамика развития разряда отслеживалась с использованием двух камер PCO (dicam C1) со временем экспозиции 60–70 нс. Камеры были синхронизованы друг с другом с точностью ≈ 0.5 нс и регистрировали кадры с задержкой друг относительно друга ≈ 10 нс. Камеры были закрыты стеклянными светофильтрами с $\sim 80\%$ пропусканием в диапазоне 300–400 нм. Вдоль разрядного промежутка была установлена группа сцинтилляционных детекторов (SD1–SD6) рентгеновского излучения (рис. 1). В основе детекторов использовался фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-30), состыкованный с пластиковым сцин-

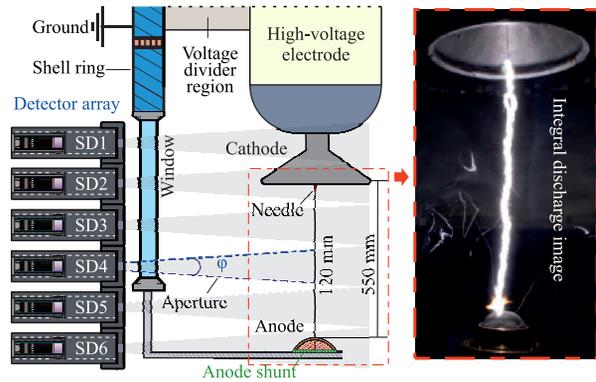


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема регистрации рентгеновского излучения из разрядного промежутка группой сцинтилляционных детекторов со свинцовыми диафрагмами

тиллятором, изготовленным из полистирола со сцинтиллирующими добавками (p-терфенил + POPOP). Во избежание нежелательных наводок от разряда регистрирующая часть каждого детектора была помещена внутрь алюминиевой трубы, по внутренней поверхности которой был дополнительно установлен спиральный магнитный экран из высоконикелевого пермаллоя. Вся сборка дополнительно помещалась внутрь бесшовной свинцовой трубы, которая имела толщину 1 см и внутренний диаметр 12 см. На торце свинцовых труб были закреплены свинцовые диафрагмы толщиной 1 см и с диаметром сквозного отверстия 4 см. Эффективная апертура детекторов позволяла разбивать весь разрядный промежуток на независимые пространственные зоны благодаря не пересекающимся апертурам соседних детекторов. На оси разрядного промежутка диаметр “вырезаемых” зон разряда составлял 12 см. Таким образом, разрешались катодная, прикатодная, анодная, прианодная области и середина промежутка. Центр диафрагм был плотно закрыт алюминиевой фольгой толщиной 100 мкм, что соответствует 100х ослаблению моноэнергетического пучка фотонов с энергией 5 кэВ. Хотя, с учетом поглощения низкоэнергетических квантов в воздухе при нормальных условиях на дистанции 1 м от оси разрядного промежутка до детекторов, мы полагаем, что регистрируемые вспышки рентгеновского излучения по своему энергетическому спектру снизу ограничивались характерными энергиями в подавляющем большинстве случаев ~ 10 –20 кэВ. Калибровочные эксперименты показали, что используемые сцинтилляционные детекторы позволяют разрешать одиночные вспышки рентгеновского излучения с временным разрешением не хуже 3 нс, а величина характерного джиттера

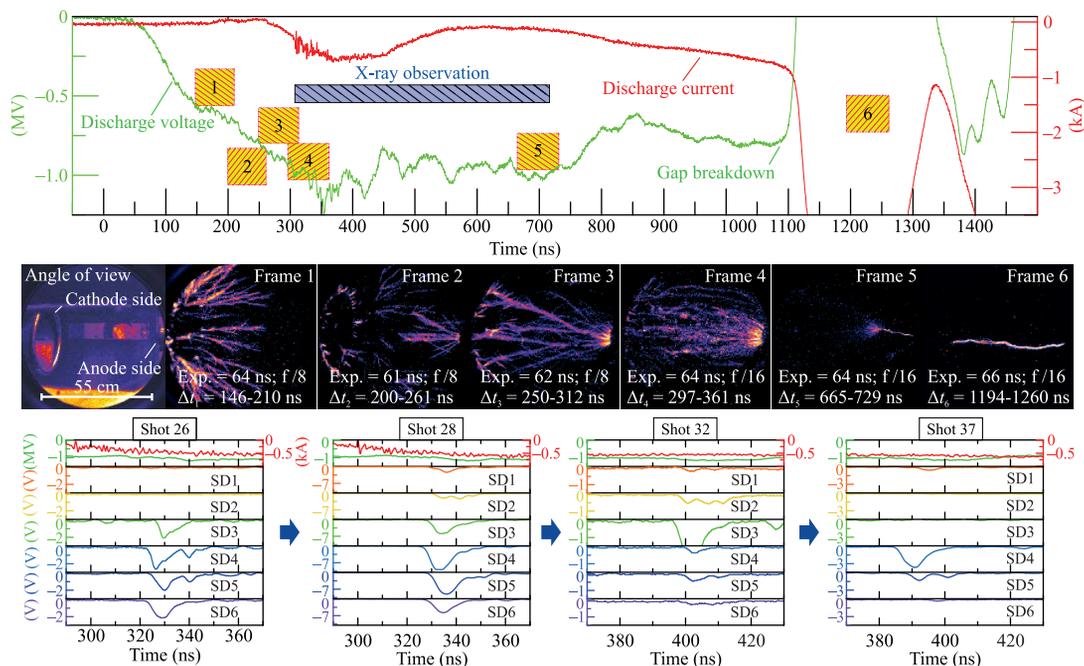


Рис. 2. (Цветной онлайн) Верхняя панель: типичные кривые тока и напряжения разряда. Средняя панель: хронология развития разряда, кадры 1–6 отмечены на верхней панели. Нижняя панель: сигналы тока, напряжения, рентгеновского излучения с детекторов SD1–SD6 в различных выстрелах

всех ФЭУ детекторов не превышает 1 нс. В экспериментах сигналы всех детекторов и измерительных датчиков регистрировались цифровыми осциллографами (1 ГГц, 5 Гвыб/с).

На рисунке 2 представлена хронология развития разряда в исследуемом промежутке, включая типичные осциллограммы тока и напряжения разряда. Благодаря стабильности работы большой высоковольтной установки и хорошей повторяемости выстрелов, приведенные кривые тока и напряжения практически ничем не отличаются от любых других, полученных в условиях используемой конфигурации электродов и полярности прикладываемого импульса напряжения. Особенности эволюции разряда на различных временных стадиях ранее были подробно описаны в работах [21, 29]. Поэтому, сразу перейдем к стадии развития разряда (соответствующей предпробойной стадии), когда наблюдается генерация рентгеновского излучения. Во-первых, отметим, что по времени это та стадия развития разряда, когда через промежуток уже протекает ток в максимуме до ~ 500 А (характерный предимпульс тока). Напряжение разряда в это время близко к 1 МВ. Во-вторых, как показывает статистика по многим выстрелам (серия порядка 1000 выстрелов), генерация рентгеновского излучения наблюдается в той стадии

развития разряда, когда в промежутке уже возникает сложная плазменная система, состоящая из множества стримерных каналов. Данные факты позволяют предполагать, что существенную роль в провоцировании генерации рентгеновского излучения могут играть ионизационные процессы в уже развитой плазменной системе, впоследствии переходящей в стадию диффузного разряда. Заметим, что схожие результаты были получены авторами работы [3] при исследовании электрических пробоев воздушных промежутков длиной 12 см при прикладывании к ним импульсов напряжения амплитудой 200 кВ.

Рассмотрим ряд одиночных выстрелов на рис. 3. В данных выстрелах эмиссия рентгеновского излучения была зарегистрирована непосредственно во временных промежутках фотосъемки быстрыми камерами, в окне скважности между кадрами двух камер, либо близко к нему. Примечательно, что во время фотосъемки в плазменной системе разрядного промежутка наблюдаются множественные ветвящиеся плазменные структуры, состоящие из стримерных каналов, а также некоторые результирующие плазменные каналы, протягивающиеся сквозь весь разрядный промежуток и соединяющие противоположные электроды. Интересно отметить, что вдоль результирующих каналов прослеживаются яркие сфе-

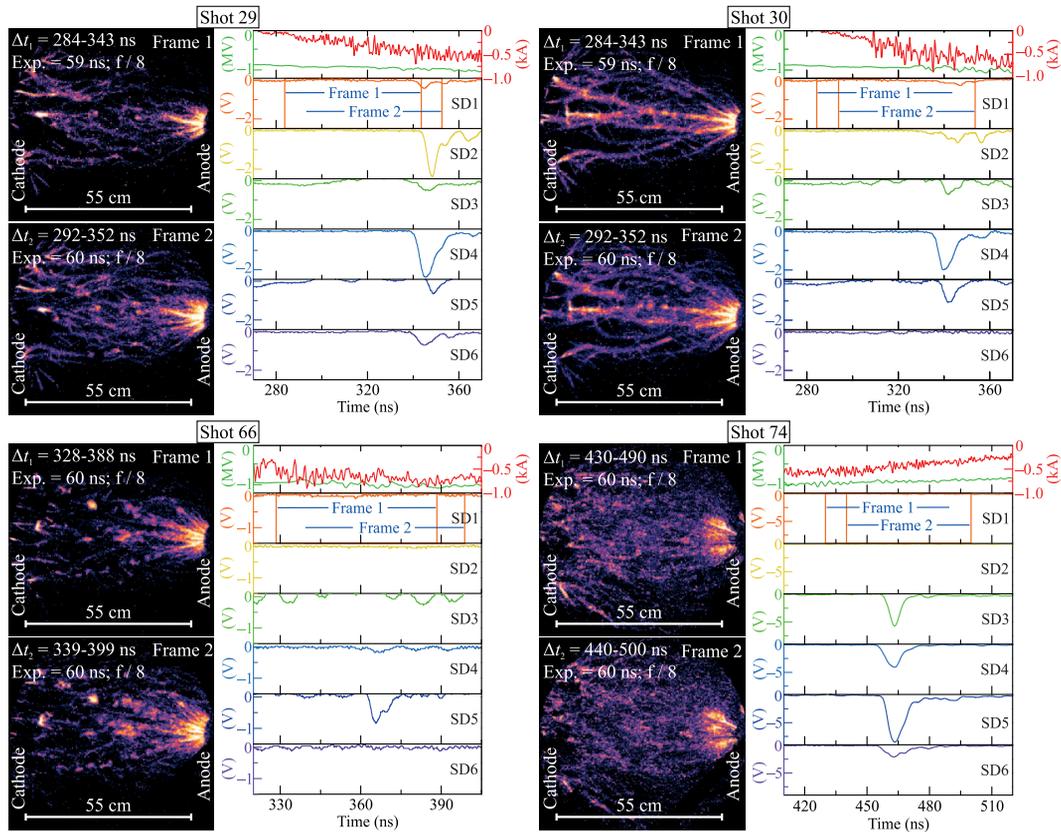


Рис. 3. (Цветной онлайн) Пространственно-временная локализация вспышек рентгеновского излучения в одиночных выстрелах

рические сгустки плазмы, создающие эффект “четочной структуры” каналов [30, 31]. Авторы ряда работ [27] предполагают, что такими зонами могут являться области интенсивного плазмообразования вследствие генерации вторичных волн ионизации, появление которых может сопровождаться всплесками на осциллограммах тока. Мы, однако, таких особенностей на кривых тока разряда с анодного пунта не наблюдаем (за исключением наводки от широкополосного радиоизлучения, также порождаемого разрядом [17]), в том числе в момент генерации рентгеновского излучения. В последнем случае кривые тока относительно гладкие, а характерная амплитуда предимпульса тока составляет ~ 500 А при напряжении ~ 1 МВ. Детальный анализ плазменных структур на фотографиях на рис. 3, зарегистрированных двумя камерами с относительной задержкой друг относительно друга ≈ 10 нс, показал, что в момент генерации рентгеновского излучения никаких заметных перемещений светящихся плазменных формирований не прослеживается. Что касается характера эмиссии рентгеновского излучения в периферию разряда, то видно, что в некоторый мо-

мент времени генерация излучения (фотоны с энергиями > 5 кэВ и вряд ли выше ≈ 300 кэВ в соответствии с измерениями, ранее выполненными в [32, 33]) может начинаться практически синхронно во всем разрядном промежутке. Минимальное значение относительной задержки между началом роста сигналов с рентгеновских детекторов составляет 0.5–1 нс, что укладывается в масштаб величины джиттера ФЭУ детекторов, установленный в серии калибровочных измерений. Аналогичный результат был получен авторами работы [4], где тоже прослеживалась синхронная генерация рентгеновского излучения во всем разрядном промежутке, хотя его длина была на порядок короче. Рентгеновское излучение при этом регистрировалось в стадии развития разряда, когда через промежуток протекал ток амплитудой несколько сотен ампер. Интенсивность вспышек рентгеновского излучения на рис. 3 различна вдоль разрядного промежутка, что может быть связано с естественной анизотропией излучения [12], в том числе с его сложным спектральным составом и общей спорадичностью во времени и в пространстве. В подавляющем большинстве вспышек эмиссия рентге-

новского излучения наблюдается в промежутке от кромок катодного конуса до заземленного анода.

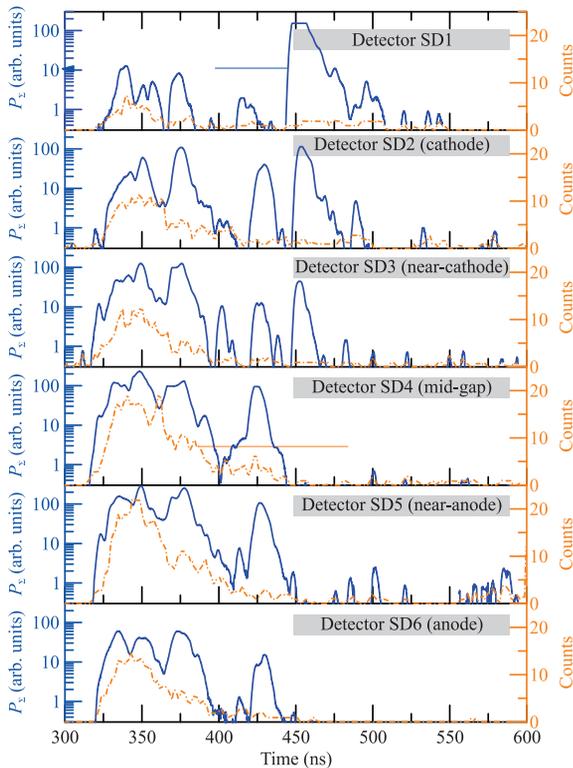


Рис. 4. (Цветной онлайн) Пространственно-временные распределения суммарной мощности сигналов и количества наблюдений всплеск рентгеновского излучения, полученные в серии из 60 выстрелов

На рисунке 4 представлены статистические распределения количества наблюдений всплеск рентгеновского излучения и суммарной мощности всплеск (P_{Σ} – сумма квадратов амплитуд всех полезных сигналов выше уровня шума) для каждой из локализованных зон разрядного промежутка. Видно, что интенсивность излучения отнюдь не доминирует в области анода (детектор SD6). Хотя можно было бы ожидать здесь большой вклад в эмиссию рентгеновского излучения за счет тормозного излучения быстрых электронов на металлическом аноде. Характеристическое излучение материала самого анода находится ниже рассматриваемого диапазона энергий фотонов. Примечательно, что высокая интенсивность эмиссии рентгеновского излучения наблюдается в области катода (детектор SD2), прикатодной (детектор SD3) и прианодной области (детектор SD5) и в середине промежутка (детектор SD4), где главенствующую роль в генерации рентгеновского излучения должны играть рассеяния быстрых электронов на ядрах компонентов воздуха. Сигна-

лы с детектора SD1 редко регистрировались в эксперименте, а наибольшая их амплитуда, как правило, достигалась в поздней стадии развития разряда. Вероятно, это было связано с частичным развитием разряда в направлении корпуса большой установки в области за катодом. Статистика наблюдений также указывает на наиболее выраженную эмиссию рентгеновского излучения в середине промежутка и прианодной области. В связи с этим, можно предположить, что ионизационные процессы, провоцирующие генерацию рентгеновского излучения, интенсивнее всего развиваются и создают соответствующие условия для генерации излучения вдали от электродов. Данное предположение находится в согласии с измерениями авторов работы [4], где было установлено, что наиболее вероятное местоположение источника рентгеновского излучения не связано с прианодной областью и находится на глубине разрядного промежутка.

Отталкиваясь от динамики развития разряда, можно было бы ожидать, что условия для возникновения пучков или лавин быстрых электронов (локальные области с полем выше порога убегания ~ 250 кВ/см в воздушной среде, в масштабе которых электроны способны набрать энергию, достаточную для последующего убегания [34]) возникают тогда, когда первые стримеры с анода подходят вплотную к катоду и контактируют с ним. В момент замыкания стримера на электрод противоположной полярности возможно возникновение малой зоны пространства с очень высоким электрическим полем [35, 36]. В такой локальной зоне прикатодной области с высоким электрическим полем можно было бы ожидать существенного усиления автоэлектронной эмиссии с последующим формированием пучков убегающих электронов [37]. В эксперименте эмиссия рентгеновского излучения, однако, всегда начинается позже, спустя десятки наносекунд после первых актов замыкания противоположных электродов растущими стримерами с анода, и приходится на стадию развития разряда, когда в промежутке наблюдается развитая система плазменных каналов.

Ясно, что получить однозначный ответ на вопрос о том, что же за механизм генерации рентгеновского излучения осуществляется в плазменной системе на рис. 2 и 3, достаточно трудно. Тем не менее, обратимся к результатам недавних работ [27, 28], в которых рассматривались вторичные поверхностные волны ионизации, распространяющиеся вдоль плазменных каналов и способные создавать условия для генерации рентгеновского излучения. На наш взгляд, эта концепция имеет право на существование, по-

скольку в условиях разряда на рис. 2 и 3 генерация рентгеновского излучения наблюдается исключительно в развитой стадии разряда, когда формируется множество плазменных каналов при напряжении 1 МВ и протекает ток разряда амплитудой порядка 500 А. В модели, представленной в [27], предполагается, что вторичные волны ионизации возникают по обе стороны от области смыкания встречных стримеров противоположной полярности и распространяются от нее (после контакта встречных стримеров) вдоль стримерных каналов. Авторами показано, что если учесть возникновение вторичных волн ионизации и дальнейшее их распространение в противоположные стороны от области смыкания встречных стримеров, то в данной области после контакта стримеров могут быть достигнуты более высокие электрические поля на более протяженных участках пространства, необходимых для разгона электронов до энергий, по крайней мере, единиц кэВ. В модели, предложенной в работе [28], не обсуждаются причины возникновения вторичных волн ионизации, но рассматриваются специфики их распространения вдоль искривленных плазменных каналов. В частности, описан механизм генерации рентгеновского излучения быстрой вторичной волной ионизации, проходящей область с резким искривлением плазменного канала. В такой ситуации механизм генерации рентгеновского излучения может быть описан в терминах эмиссии синхротронного излучения. Ожидается также, что чем выше скорость волны и проводимость плазменного канала и меньше радиус его изгиба в пространстве, тем сильнее выражена эмиссия рентгеновского излучения. В модели [27], напротив, предполагалась невысокая проводимость плазменных каналов (другими словами, рассматривалась менее ионизованная среда), чтобы электроны в области смыкания стримеров могли ускоряться с меньшими потерями набираемой энергии в виду их кулоновского взаимодействия с другими электронами газоразрядной плазмы.

Не исключено, что оба механизма генерации рентгеновского излучения, рассмотренные в работах [27, 28], правильно предсказывают суть наблюдаемых явлений. Например, когда вследствие смыкания встречных стримеров возникают результирующие плазменные каналы между электродами, и по ним начинается распространение вторичных волн ионизации. Если при этом образовавшиеся результирующие каналы имеют множественные зоны с резкими изгибами и “четочную структуру” (что характерно для результирующих каналов, наблюдаемых на рис. 2 и 3), то распространяющиеся по каналам

вторичные волны ионизации могут создавать условия для генерации рентгеновского излучения в соответствии с обоими предложенными механизмами. В этом плане интересно отметить следующий факт, что если бы возникновение эмиссии рентгеновского излучения было связано с возникновением и последующим распространением вторичной волны ионизации, то начало эмиссии данного излучения для каждого детектора вдоль оси разряда начиналось бы с некоторым запаздыванием (единицы наносекунд). Например, мы бы видели задержку в сигналах с ФЭУ от анода к катоду или наоборот, или же от середины промежутка в направлении обоих электродов. Заметим, что подобный результат ранее был получен в [4] при исследовании генерации рентгеновского излучения в 12 см воздушных промежутках. Авторам удалось выявить тенденцию опережающего сигнала рентгеновского излучения из прикатодной области по сравнению с сигналами из других областей промежутка. Скорость распространения области генерации рентгеновского излучения от катода к аноду была не менее 10^{10} см/с. Мы полагаем, что так или иначе такой эффект можно проверить и в наших условиях эксперимента в специальных измерениях, в которых разрядный промежуток будет сделан длиннее, а детекторы будут закрыты узкими вертикальными щелевыми свинцовыми диафрагмами. В последующих работах мы постараемся провести соответствующие эксперименты, основываясь на результатах данной работы.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств Российского научного фонда (грант # 23-19-00524).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. L. P. Babich, *High-energy phenomena in electric discharges, in dense gases: Theory, experiment, and natural phenomena*, Futurepast Incorporated, Arlington (Va.) (2003).
2. L. P. Babich, T. V. Loiko, and V. A. Tsukerman, *Soviet Phys.-Uspekhi* **33**, 521 (1990).
3. P. Repin and A. Rep'ev, *Technical Physics* **49**, 839 (2004).
4. A. Rep'ev and P. Repin, *Technical Physics* **53**, 73 (2008).
5. E. Baksht, A. Burachenko, A. Kozyrev, I. Kostyrya, M. Lomaev, V. Petin, D. Rybka, V. Tarasenko, and S. Shljakhtun, *Technical Physics* **54**, 47 (2009).
6. S. Alekseev, E. K. Baksht, A. Boichenko, I. Kostyrya, V. Tarasenko, and A. Tkachev, *Technical Physics* **57**, 1192 (2012).

7. V. Pokrovskii, P. B. Repin, and A. Trushkina, *Technical Physics* **65**, 182 (2020).
8. L. Contreras-Vidal, C. L. da Silva, and R. G. Sonnenfeld, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56**, 055201 (2022).
9. P. O. Kochkin, C. V. Nguyen, A. P. van Deursen, and U. Ebert, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 425202 (2012).
10. P. O. Kochkin, A. P. van Deursen, and U. Ebert, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 025205 (2014).
11. P. O. Kochkin, A. P. van Deursen, and U. Ebert, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**, 145203 (2014).
12. A. Agafonov, A. Oginov, A. Rodionov, V. Ryabov, and K. Shpakov, *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**, 095014 (2019).
13. C. B. Moore, K. B. Eack, G. D. Aulich, and W. Rison, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 2141 (2001).
14. J. R. Dwyer, H. K. Rassoul, M. Al-Dayeh, L. Caraway, A. Chrest, B. Wright, E. Kozak, J. Jerauld, M. A. Uman, V. A. Rakov, D. M. Jordan, and K. J. A. Rambo, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L01803 (2005).
15. J. Howard, M. A. Uman, J. R. Dwyer, D. Hill, C. Biagi, Z. Saleh, J. Jerauld, and H. K. Rassoul, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L13817 (2008).
16. J. Montanyà, F. Fabró, V. March, O. van der Velde, G. Solà, D. Romero, and O. Argemí, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **136**, 94 (2015).
17. E. Parkevich, A. Khirianova, T. Khirianov, I. Baidin, K. Shpakov, A. Rodionov, Y. K. Bolotov, V. Ryabov, S. Ambrozevich, and A. Oginov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **134**, 153303 (2023); <https://doi.org/10.6100/IR783261>.
18. C. V. Nguyen, A. P. van Deursen, and U. Ebert, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 234012 (2008).
19. P. Hettiarachchi, V. Cooray, M. Rahman, and J. Dwyer, *Atmosphere* **8**, 244 (2017).
20. P. Kochkin, *Understanding lightning : experiments on meter long discharges and their x-rays (2014)*, phd Thesis 1 (Research TU/e/Graduation TU/e), *Electrical Engineering*, Technische Universiteit Eindhoven (2014).
21. E. V. Parkevich, K. V. Shpakov, I. S. Baidin, A. A. Rodionov, A. I. Khirianova, T. F. Khirianov, Ya. K. Bolotov, M. A. Medvedev, V. A. Ryabov, Yu. K. Kurilenkov, and A. V. Oginov, *Phys. Rev. E* **105**, L053201 (2022).
22. A. V. Gurevich and K. P. Zybin, *Physics.-Uspekhi* **44**, 1119 (2001).
23. G. Mesyats, N. Zubarev, and I. Vasenina, *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **47**, 209 (2020).
24. M. A. Ihaddadene and S. Celestin, *Geophys. Res. Lett.* **42**, 5644 (2015).
25. C. Köhn, O. Chanrion, and T. Neubert, *Geophys. Res. Lett.* **44**, 2604 (2017).
26. L. Babich and E. Bochkov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 455202 (2017).
27. V. Cooray, G. Cooray, M. Rubinstein, and F. Rachidi, *Atmosphere* **12**, 1101 (2021).
28. N. Petrov, *Sci. Rep.* **11**, 19824 (2021).
29. E. V. Parkevich, A. I. Khirianova, T. F. Khirianov, I. S. Baidin, K. V. Shpakov, D. V. Tolbukhin, A. A. Rodionov, Ya. K. Bolotov, V. A. Ryabov, S. A. Ambrozevich, and A. V. Oginov, *Phys. Rev. E* **108**, 025201 (2023).
30. S. Vayanganie, V. Cooray, M. Rahman, P. Hettiarachchi, O. Diaz, and M. Fernando, *Phys. Lett. A* **380**, 816 (2016).
31. V. Tarasenko, D. Beloplotov, A. Burachenko, and E. Baksht, *Journal of Atmospheric Science Research* **3**, 1 (2020).
32. A. A. Rodionov, A. Agafonov, V. Ryabov, K. Shpakov, I. Baidin, Y. K. Bolotov, M. Medvedev, E. Parkevich, A. Mozgovoi, and A. Oginov, *JETP Lett.* **116**, 224 (2022).
33. A. A. Rodionov, A. Agafonov, V. Ryabov, K. Shpakov, I. Baidin, Y. K. Bolotov, M. Medvedev, E. Parkevich, A. Mozgovoi, and A. Oginov, *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **49**, 221 (2022).
34. G. D. Moss, V. P. Pasko, N. Liu, and G. Veronis, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **111**, A02307 (2006).
35. D. V. Beloplotov, V. F. Tarasenko, and D. A. Sorokin, *JETP Lett.* **116**, 293 (2022).
36. D. V. Beloplotov, V. F. Tarasenko, V. A. Shklyae, and D. A. Sorokin, *JETP Lett.* **113**, 129 (2021).
37. N. M. Zubarev and G. A. Mesyats, *JETP Lett.* **113**, 259 (2021).