

СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ВСТРЕЧНЫХ РАЗНОПОЛЯРНЫХ СТРИМЕРОВ ПРИ МОНОИМПУЛЬСНОМ СКОЛЬЗЯЩЕМ РАЗРЯДЕ В КСЕНОНЕ

*К. К. Трусов**

*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 9 мая 2026 г.
после переработки 4 июня 2026 г.
Принята к публикации 5 июня 2026 г.

Проведены экспериментальные измерения скорости движения встречных стримеров в Хе атмосферного давления, распространяющихся вдоль поверхности диэлектрика при скользящем разряде под действием однократных униполярных импульсов напряжения амплитудой 2.9–3.2 кВ положительной или 4–4.5 кВ отрицательной полярности с фронтом нарастания 40 нс и длительностью более 30 мкс. Измерения выполнены на установке, ранее примененной в аналогичных опытах с Ne, следуя методике, основанной на регистрации задержки излучения головки стримеров в семи разных участках разрядного промежутка длиной 11.6 см. Показаны экспоненциальное уменьшение скорости первичных стримеров по мере движения в промежутке; скачок скорости вверх до 11 раз вблизи заземленного электрода при трансформации первичных стримеров в обратные; монотонное увеличение скорости обратных стримеров при движении в промежутке, отличное от экспоненциальной зависимости. Полученные результаты обсуждаются и сопоставляются с аналогичными данными для Ne, полученными в экспериментах ранее.

Ключевые слова: скользящий разряд, встречные стримеры, скорость стримеров, волна ионизации, инертные газы, ксенон

DOI: 10.31857/S0044451026080077

1. ВВЕДЕНИЕ

Скользящий электрический разряд в газах (СР) известен достаточно давно [1], и термин «скользящий» выделяет отличительную черту, такую что СР распространяется вблизи поверхности диэлектрика между двумя электродами. В зависимости от условий возбуждения, СР может протекать в слаботочной диффузной/стримерной или в сильноточной искровой/многоискровой форме. Среди поверхностных разрядов, наряду с СР, большое внимание уделяется поверхностным барьерным разрядам (ПБР), в которых по крайней мере один из электродов изолирован от разрядного промежутка слоем диэлектрика и ток такого разряда ограничен величиной, близкой к емкостному току смещения через диэлектрик.

СР и ПБР инициируются подачей импульсного напряжения на один из электродов, в результате чего от него вблизи поверхности диэлектрика развивается волна ионизации (ВИ) газа в диффузной или стримерной форме. Несмотря на большую аналогию механизмов развития ПБР и СР, последний при повышенном напряжении питания может трансформироваться из слаботочной в искровую форму, тогда как в ПБР искровая стадия недостижима в силу ограниченности полного тока величиной тока смещения. Несмотря на длительный период изучения поверхностных разрядов, интерес к ПБР и СР продолжается в настоящее время и касается, в первую очередь, детализации физических механизмов их развития и совершенствования теоретического представления. Исследованию лежащей в их основе динамики развития ВИ в диффузной/стримерной формах посвящено множество экспериментальных и теоретических работ, обзор которых детально представлен, например, в [2–6]. В плане прикладного применения СР интересен как

* E-mail: trusovkk@lebedev.ru

мощный масштабируемый источник излучения и свободных электронов [7–14]. В общем объеме работ сравнительным исследованиям разнополярных моноимпульсных разрядов на одной установке, когда единственным переключаемым параметром является полярность питающего напряжения, внимания уделено сравнительно мало.

В последние годы автором выполнены именно сравнительные экспериментальные исследования характеристик разнополярных слаботочных и сильноточных многоканальных СР [15–18] и численное моделирование характеристик ВИ (см. [19] и ссылки в ней) в He, Ne, Ar и Xe. Эксперименты проводились в режиме однократных униполярных импульсов, и основное внимание уделялось интегральной за импульс пространственной структуре каналов в промежутке. Получены данные о плотности заполнения разрядного промежутка стримерными/искровыми каналами, длине стримерных каналов при разной полярности и амплитуде питающего напряжения. Осциллографическая регистрация излучения стримеров в Ne атмосферного давления позволила измерить их скорость движения и интенсивность излучения в разных участках разрядного промежутка [18, 20]. Были зафиксированы два типа стримеров, первичных и обратных, распространяющихся во встречном друг к другу направлении в течение каждого однократного импульса СР положительной или отрицательной полярности. Результаты измерений нашли качественное объяснение частично, только в отношении первичных стримеров [20]. Но такие характеристики, как скачок скорости при трансформации первичных стримеров в обратные на низковольтном электроде и увеличение скорости обратных стримеров по мере их движения в промежутке, остались без обоснования ввиду ограниченного объема данных. Ранее прямые и обратные ВИ наблюдались в длинных газоразрядных трубках низкого давления (см. [21, 22] и ссылки в них), механизм их генерации обсуждался с разных точек зрения. Настоящая работа посвящена экспериментальному измерению скорости движения встречно направленных стримеров в Хе при моноимпульсном слаботочном СР атмосферного давления на поверхности Al_2O_3 -керамики на той же установке, что и в опытах с Ne [18, 20], с целью расширить область измерений на другие инертные газы, ионизационно-транспортные свойства которых значительно различаются, и в первую очередь на Хе.

В работе представлены результаты измерения скорости движения первичных и обратных стримеров в Хе в семи разных участках вдоль промежутка

длиной 11.6 см при амплитуде приложенного к нему напряжения 2.9–3.2 кВ положительной или 4–4.5 кВ отрицательной полярности. Полученные зависимости скорости от положения головки стримеров обоих типов вдоль промежутка сопоставлены с данными [18] для Ne. Результаты показали практически экспоненциальное уменьшение скорости первичных стримеров вдоль промежутка с близкими величинами декремента в двух газах при обеих полярностях питания. Распределение скорости обратных стримеров вдоль промежутка имеет более сложный, неоднозначный характер и заметно различается для разных газов. Скачок скорости обратных стримеров вблизи низковольтного электрода качественно аналогичен в двух газах, но в 1.5–2 раза больше в Хе.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Принципиальная схема установки и измерений

Полная схема электрической и оптической частей установки представлена в [20], здесь ограничимся ее кратким описанием. Она включает газоразрядную камеру, вакуумированную и наполненную исследуемым газом, с плоскопараллельными электродами, лежащими на поверхности керамической пластины; набор непрозрачных масок со щелевидными отверстиями, выделяющими нужный участок разрядного промежутка; фотоумножитель, регистрирующий интенсивность излучения стримеров; низкоомный токовый шунт и резистивный датчик напряжения, регистрирующие ток разряда и напряжение на высоковольтном электроде; осциллограф; источник униполярного импульсного напряжения переключаемой полярности. На рис. 1 схематически показана газоразрядная камера с элементами электрической и оптической регистрации сигналов.

Газоразрядный промежуток прямоугольной формы образован диэлектрической пластиной 1 из Al_2O_3 -керамики толщиной 0.17 см с боковыми керамическими вставками, ограничивающими ширину разрядной зоны величиной $H = 9.5$ см; высоковольтным 2 и заземленным 3 плоскопараллельными электродами шириной 9.3 см и толщиной 0.07 см на расстоянии $l = 11.6$ см друг от друга, плотно прилегающими к пластине 1 сверху; прозрачным окном 4, покрывающим разрядную область камеры, для вывода излучения плазмы; токонесущей шиной в виде заземленной металлической пластины

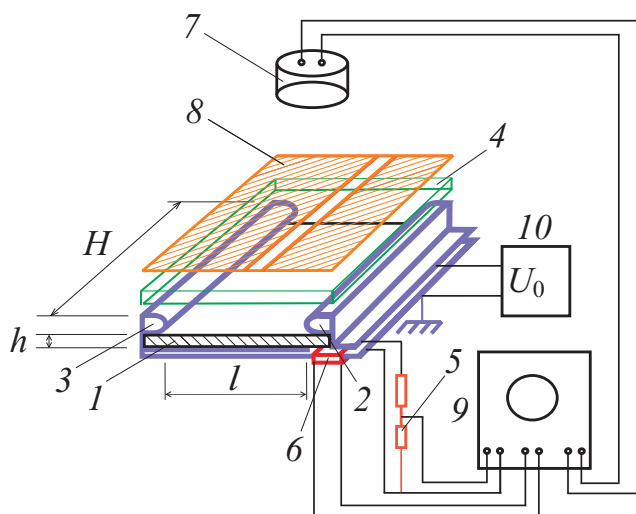


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры с элементами электрооптической регистрации сигналов. 1 — прямоугольная пластина из Al_2O_3 -керамики; 2 и 3 — высоковольтный и заземленный плоскопараллельные электроды; 4 — прозрачное окно; 5 — датчик напряжения; 6 — токовый шунт; 7 — фотоумножитель; 8 — одна из набора семи масок со щелью; 9 — осциллограф; 10 — источник импульсного униполярного напряжения

шириной 9.3 см, плотно прилегающей к пластине 1 снизу и соединенной с электродом 3 по всей ширине и источником питания. В качестве измерительных датчиков применены активный делитель напряжения 5, низкоомный токовый шунт 6, встроенный в токонесущую шину, фотоумножитель 7 типа ФЭУ-39 (спектральный диапазон чувствительности 220–630 нм) для регистрации излучения плазмы. Выбором одной из набора семи непрозрачных масок 8 со щелевым окном шириной 0.7 см, плотно примыкающей к окну 4, выделяются интересные зоны промежутка для оптической регистрации. Сигналы всех датчиков регистрируются осциллографом 9 марки Tektronix TDS-5054 500 МГц. Источник питания 10 обеспечивает униполярные импульсы напряжения в виде «ступеньки» амплитудой U_0 до 10 кВ переключаемой полярности с фронтом нарастания 40 нс (по уровню 0.1–0.9 амплитуды) и длительностью более 30 мкс. Временное разрешение цепей измерения электрических и оптических сигналов составляет 1.5 нс и 5 нс соответственно. Высота разрядной зоны между пластиной 1 и окном 4 равна $d = 0.6$ см. Жирными линиями на рис. 1 выделены токонесущие шины и электроды.

Многостримерный разряд в газе возбуждается подачей импульса напряжения амплитудой U_0 заданной полярности от источника питания 10 на

электрод 2. В результате в разрядном промежутке формируется пространственно-временное распределение электрического потенциала $U(x, t)$ относительно заземленных элементов схемы, электрода 3 и токонесущей шины, величина которого максимальна на электроде 2 и изменяется во времени в процессе последующего развития разряда. Здесь t — время от начала импульса, x — расстояние интересующей точки от электрода 2 в направлении движения стримеров. Первичные стримеры, число которых составляет несколько десятков, инициируются на электроде 2 по всей его ширине и далее движутся параллельно друг другу вдоль поверхности пластины 1, скользя по ней, в сторону электрода 3. В зависимости от величины U_0 стримеры могут прекратить движение где-то в промежутке или достигнуть заземленного электрода 3 (аналогично опыту с Ne в [17]), замкнув тем самым разрядный промежуток. Замыкание промежутка дает начало обратным стримерам вблизи электрода 3, движущимся к электроду 2, но не приводит к обязательному преобразованию стримерного разряда в искровой. Для этого необходимо, во-первых, чтобы обратные стримеры достигли электрода 2, подобно Ne в [18], и, во-вторых, несколько повышенная величина U_0 . Исходя из того, что первичные и обратные стримеры движутся во взаимно противоположных направлениях, их можно классифицировать как положительные и отрицательные стримеры.

Семь взаимозаменяемых непрозрачных масок 8 (рис. 1) изготовлены с одинаковыми щелевыми окнами размером 9.5×0.7 см² по одному в каждой маске и располагаются так, что окна ориентированы параллельно электродам, а расстояние от электрода 2 камеры до ближайшего к нему края окна равно 0.2, 1.5, 3.4, 5.3, 7.2, 9.1 и 10.6 см в зависимости от выбранной маски. Далее для удобства присвоим каждой маске индекс от А до Г в порядке удаленности их окон от электрода 2.

2.2. Методика измерений

Измерения проводились в режиме однократных импульсов питания амплитудой U_0 , равной 2.9 кВ и 3.2 кВ положительной полярности, либо 4 кВ и 4.5 кВ отрицательной полярности, переключаемой по необходимости. Указанные величины начального потенциала электрода 2 не случайны, а соответствуют верхней и нижней границам диапазона устойчивой регистрации стримеров обоих типов. Период повторения импульсов составлял 5–6 мин, что исключало влияние эффекта памяти заряда на поверхности

сти пластины 1 на измеряемые величины. В каждом опыте регистрировались осциллограммы: потенциала электрода 2 $U(x=0, t)$, тока разряда $I(t)$ и интенсивности излучения плазмы $P(t)$. Осциллограммы $U(x=0, t)$ служили для контроля режима разряда, а для последующей обработки фиксировались амплитуда и форма импульсов тока $I(t)$, амплитуда $P_{\max}$ и временная задержка ΔT начала импульсов $P(t)$ от момента $t = 0$. Полученные величины ΔT усреднялись, аналогично [18], по 15–20 измерениям для улучшения точности результата и затем скорость стримеров V определялась как отношение расстояния между окнами соседних масок к разнице задержек импульсов $P(t)$ между этими масками. Статистическая погрешность определения скорости в Хе составила $\approx 12\%$ во всем диапазоне измерений и оказалась выше соответствующей величины $\approx 9\%$ в Не [20], что связано в значительной мере с более узким диапазоном величин U_0 , доступным для измерений, и более крутой зависимостью $V(U_0)$ в Хе по сравнению с Не. В экспериментах применялся особо чистый ксенон марки 6.0 с содержанием примесей не более $10^{-4}\%$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 показаны типичные осциллограммы трех регистрируемых характеристик разряда в Не и Хе. Здесь и далее под величинами U_0 , $U(x, t)$ и $I(t)$ будем понимать абсолютные значения электрического потенциала относительно заземленной токонесущей шины и электрода 3, а также тока разряда с указанием их полярности там, где она имеет значение.

В целом осциллограммы рис. 2 с Хе и Не в [18, 20] сопоставимы друг с другом, но и существенно различаются. Так, сигналы $U(x=0, t)$ и $I(t)$ в обоих газах начинаются одновременно, максимум тока соответствует максимальной крутизне $\partial U(x=0, t)/\partial t$ на фронте импульса потенциала электрода 2, что указывает на доминирующий вклад емкостного тока смещения в полный ток разряда. Пиковые значения тока в двух газах различаются незначительно, что и следовало ожидать от емкостного тока. К концу фронта $U(x=0, t)$ его вклад быстро снижается и далее плавно уменьшается до уровня тока проводимости приповерхностной плазмы, обеспечивающего продвижение головки стримеров. На осциллограммах $P(t)$ в Хе, аналогично Не в [18, 20] и на рис. 2 а, наблюдаются два импульса излучения, задержка которых строго зависит от типа газа и выбранной мас-

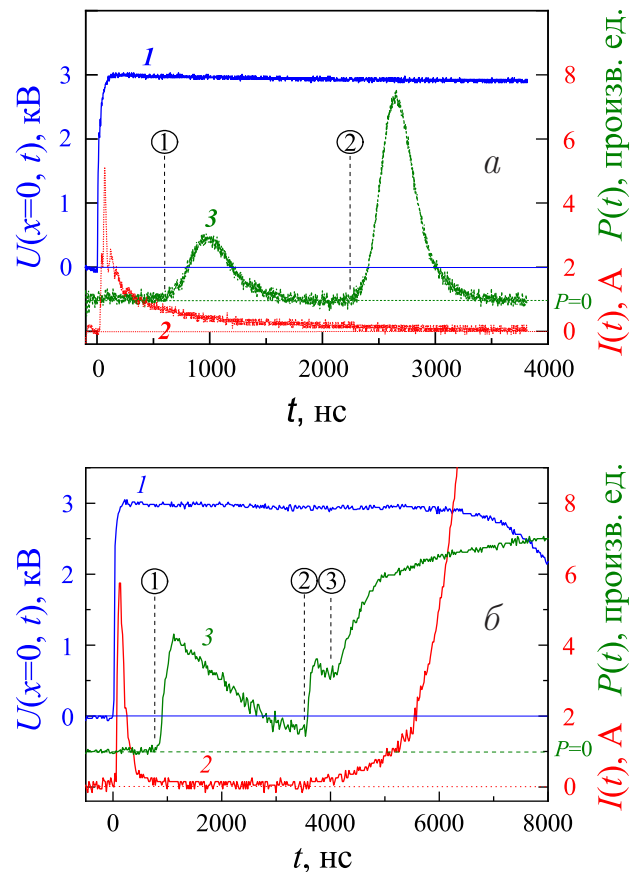


Рис. 2. Типичные осциллограммы импульсов электрического потенциала $U(x=0, t)$ (1), тока $I(t)$ (2) и интенсивности $P(t)$ (3) с маской Е при разряде в Не (а) и Хе (б) атмосферного давления (100 кПа). Напряжение питания $U_0 = 3$ кВ положительной полярности. Горизонтальные линии показывают нулевой уровень сигнала для каждой осциллограммы. Цифры в кружках ①, ② и ③ указывают моменты прихода первичного, обратного стримеров на щель маски и начала развития искры в промежутке соответственно

ки и по величине (а следовательно, и по скорости стримеров, см. рис. 3, 4 ниже) заметно различается для разных газов. Первый импульс начинается в момент ① и соответствует первичным стримерам, второй — в момент ② и соответствует обратным стримерам, а момент ③ указывает начало развития искры, максимальный ток которой в десятки раз превышает величины стримерной фазы разряда и вызывает падение потенциала вдоль промежутка. Длительности переднего фронта импульсов $P(t)$ в обоих газах близки друг к другу (≈ 220 нс в Не и ≈ 200 нс в Хе по уровню 0.1–0.9 от амплитуды импульсов) и практически одинаковы у первичных и обратных стримеров. Но затухание $P(t)$ в «хвосте» импульса

происходит в Хе примерно в 6.7 раз медленнее, чем в Не. Последнее обстоятельство несколько усложняет вид осциллограмм с Хе тем, что импульсы $P(t)$ частично накладываются друг на друга, в отличие от Не, где они раздвинуты во времени и практически не перекрываются, за исключением лишь опытов с масками **F** и **G**. Вопрос принадлежности импульсов $P(t)$ первичным и обратным стримерам детально обсуждался в [18] на примере Не, аналогичные рассуждения и заключения правомерны также в отношении Хе. Еще одно отличие разряда в Хе от случая Не проявляется в том, что искровой пробой Хе наступает с большой задержкой после прихода обратного стримера на электрод 2, а пробой Хе — с незначительной задержкой, еще на «хвосте» обратного стримера.

Хотя Не и Хе относятся к одной группе инертных газов, ионизационно-транспортные коэффициенты электронов в них значительно различаются и, вследствие этого, диапазон величин U_0 , в котором удается регистрировать стримеры обоих типов, также различен. Так, в Не такой диапазон составил 3.0–3.5 кВ при обеих полярностях U_0 , а в Хе — 2.9–3.2 кВ при положительной и 4.0–4.5 кВ при отрицательной полярности. При U_0 ниже границ указанных диапазонов первичные стримеры могут не достигать электрода 3, обратные в таких опытах вообще не регистрируются. В пределах диапазонов, ниже верхней границы, в разряде наряду со стримерами развивается искра после окончания движения стримеров, а выше верхней границы скорость процессов резко возрастает и искра препятствует регистрации излучения стримеров.

На рис. 3, 4 приведены результаты определения скорости V движения стримеров в Хе при двух полярностях U_0 и его величинах, равных граничным значениям, в сравнении с аналогичными данными для Не.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Качественно моноимпульсный СР в Хе и Не развивается во многом аналогично друг другу, но со значительными количественными различиями. В обоих газах СР по своей структуре на поверхности диэлектрика является многостримерным, в котором десятки стримеров равномерно распределены по всей ширине разрядного промежутка и распространяются в нем параллельно друг другу. Ранее подобная структура СР многократно регистрировалась в экспериментах, например, в [11], и на исполь-

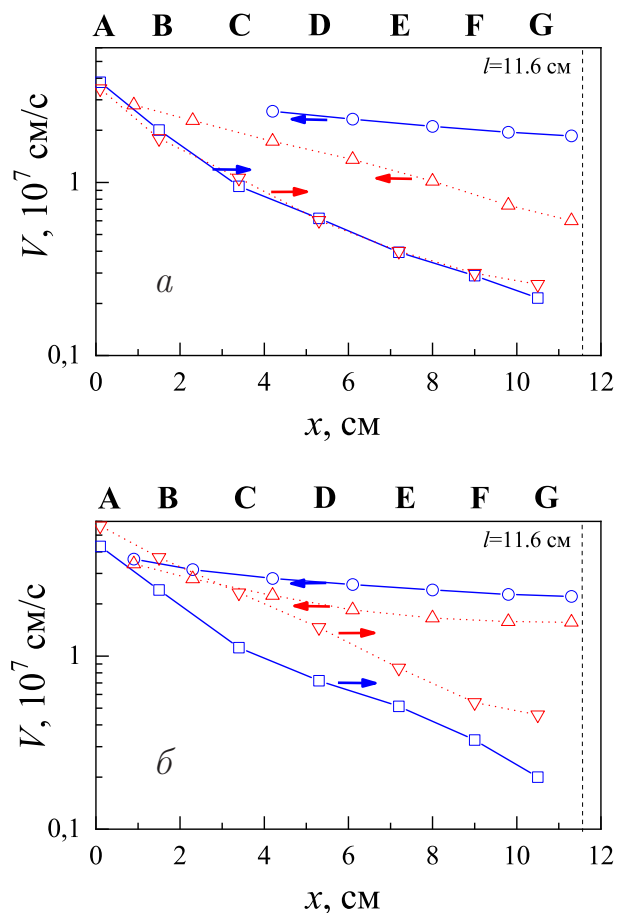


Рис. 3. Зависимости скорости движения V первичных и обратных стримеров в Хе от удаленности x фронта их головки от высоковольтного электрода камеры при U_0 , равном 2.9 (а) и 3.2 кВ (б) положительной полярности, в сравнении с аналогичными данными для Не при U_0 , равном 3 (а) и 3.5 кВ (б). Давление газов 100 кПа. Квадраты и круги показывают экспериментальные значения скорости первичных и обратных стримеров в Хе. Треугольники вершиной вниз и вверх — величины скорости в Не соответственно. Сплошные и пунктирные линии — линейная интерполяция экспериментальных величин. Горизонтальные стрелки указывают направление движения соответствующих стримеров. Индексы масок **A–G** расположены точно над экспериментальными точками первичных стримеров, соответствующими конкретной маске, и поясняют положение их окон в разрядном промежутке. Вертикальная штриховая линия при $x = 11.6$ см указывает положение заземленного электрода 3 камеры

зуемой нами установкой с переключаемой полярностью U_0 [16], а также в многочисленных экспериментах с ПБР, например, в [3–6] (см. также ссылки в них). При пониженном потенциале U_0 наблюдались короткие стримеры, длина которых меньше длины разрядного промежутка и линейно зависит от вели-

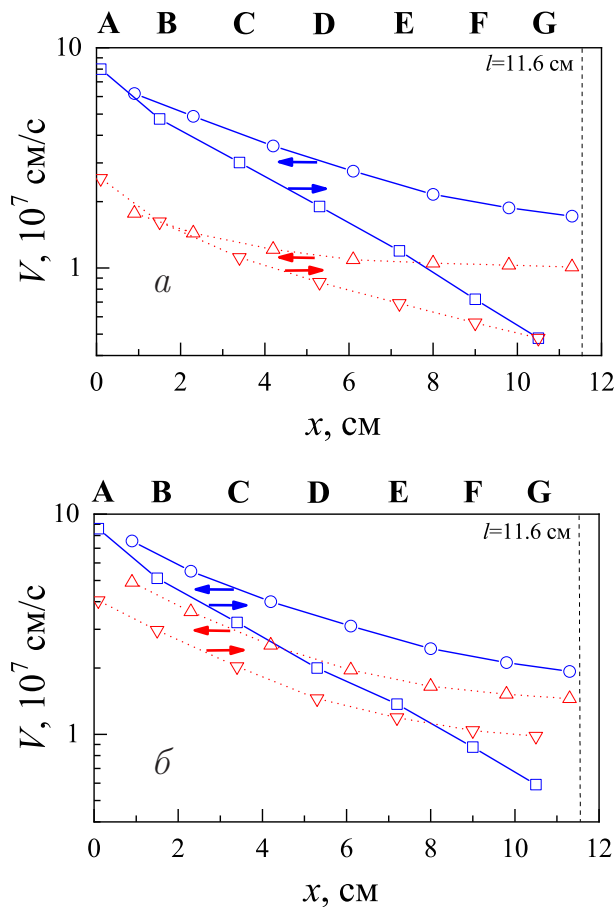


Рис. 4. Зависимости скорости V первичных и обратных стримеров в Хе, аналогичные рис. 3, но при U_0 , равном 4 (а) и 4.5 кВ (б) отрицательной полярности, в сравнении с данными для Не при 3 (а) и 3.5 кВ (б). Все обозначения идентичны принятым на рис. 3

чины U_0 , но примерно одинакова у всех параллельных стримеров, что говорит об одинаковой скорости их распространения. Проявлением такой закономерности в настоящей работе явился тот факт, что в Хе при $U_0 = 2.9$ кВ с масками **A** и **B** обратные стримеры вообще не регистрировались (рис. 3 а), а при еще меньшем потенциале первичные стримеры не достигали заземленного электрода. При $U_0 = 4$ кВ противоположной полярности обратные стримеры фиксировались даже с маской **A**, но не в каждом опыте.

Большое различие между газами во времени затухания $P(t)$ в «хвосте» импульсов — в Хе оно в 6.7 раз больше, чем в Не (см. рис. 2), — нельзя объяснить разницей в толщине фронта и размере головки стримеров по двум причинам. Во-первых, как следует из данных рис. 3 а, скорость первичных стримеров в Хе в окне маски **E** равна $3.8 \cdot 10^6$ см/с, т.е.

расстояние 0.7 см, равное ширине окна, фронт стримера проходит приблизительно за 184 нс, а «хвост» первичного стримера в Хе при этих условиях тянется около 3050 нс (по уровню 0.1 от амплитуды импульса, см. рис. 2 б). Для сравнения, длительность переднего фронта того же импульса на рис. 2 б оценивается как ≈ 200 нс (по уровню 0.1–0.9 от амплитуды) и сопоставима с временем прохождения окна маски фронтом стримера. Во-вторых, измеренная в экспериментах [15] световая ширина стримеров в Хе, а следовательно, и эквивалентный диаметр головки, составила 0.056 см, что при скорости $3.8 \cdot 10^6$ см/с соответствует промежутку времени ≈ 15 нс, т.е. приблизительно в 200 раз короче «хвоста» импульса $P(t)$. В отличие от Хе, длительность переднего фронта и «хвоста» импульса $P(t)$ в Не одинакова и оценивается как ≈ 220 нс, т.е. сопоставима с временем прохождения окна маски **E** фронтом стримера. Таким образом, излучение в «хвосте» импульса $P(t)$ у Хе связано не с головкой стримера, а с его телом позади головки, в отличие от Не, где длительность «хвоста» сопоставима с временем прохода фронта мимо окна маски. Поскольку все эксперименты выполнены на одной установке и электрические характеристики разряда близки в двух газах, причины отмеченного различия связаны с типом газа. Объяснить различие, по крайней мере частично, можно тем, что в область спектральной чувствительности фотомножителя попадает ряд сильных линий излучения однократно ионизованного атома Хе со сравнительно большой постоянной времени излучения τ . Так, согласно [23], наиболее сильными в диапазоне 220–630 нм являются линия 541.9 нм с постоянной времени $\tau \approx 16$ нс, четыре линии интенсивностью 0.7 от максимальной 484.4 нм ($\tau \approx 9.1$ нс), 529.2 нм ($\tau \approx 11.2$ нс), 597.6 нм ($\tau \approx 35.7$ нс), 605.1 нм ($\tau \approx 58.8$ нс) и одна линия интенсивностью 0.5 от максимальной 609.7 нм ($\tau \approx 38.4$ нс). Для сравнения, у однократно ионизованного атома Не аналогично выделяются две наиболее сильные линии 332.3 нм ($\tau \approx 6.25$ нс) и 377.7 нм ($\tau \approx 23.8$ нс), одна линия интенсивностью 0.8 от максимальной 376.6 нм ($\tau \approx 34$ нс) и две линии интенсивностью 0.5 от максимальной 319.8 нм ($\tau \approx 5.9$ нс), 337.8 нм ($\tau \approx 5.9$ нс). Из сравнения приведенных спектроскопических данных двух газов можно в первом приближении сказать, что суммарная по линиям продолжительность излучения у Хе до 2.5 раз больше, чем у Не.

Распределение скорости первичных стримеров в Хе вдоль промежутка показало ее затухание, очень близкое к экспоненциальному, при обеих полярно-

стях U_0 (рис. 3, 4). Если результаты измерений привести к одинаковой величине U_0 , то в Хе скорость первичных стримеров окажется несколько выше, чем в Не, хотя численное моделирование ВИ в [24, 25] показало, что при одинаковой величине приведенной напряженности электрического поля $|\mathbf{E}|/n_0$ скорость фронта ВИ в Хе должна быть меньше, чем в Не, в 6.5–2.3 раз при варьировании $|\mathbf{E}|/n_0$ от 100 до 4000 Тд соответственно. Здесь $\mathbf{E}$ — вектор напряженности поля, n_0 — плотность частиц газа. Лишь на рис. 3 а скорости первичных импульсов в Хе и Не совпали, но это не противоречит результатам [24, 25], поскольку наблюдаемая ширина стримеров, а следовательно, и радиус головки, в Не в два и более раз шире, чем в Хе [15], и при одинаковом потенциале U_0 приведенное поле $|\mathbf{E}|/n_0$ вблизи фронта ВИ в Хе значительно больше. Декремент уменьшения скорости первичных стримеров в Хе выше, чем в Не (кроме рис. 3 а), что указывает на более резкое падение потенциала вдоль промежутка из-за повышенного сопротивления плазмы позади фронта ВИ движущихся стримеров.

Распределение скорости обратных стримеров в Хе заметно отличается от экспоненциального, но ближе к нему, чем в Не. Принципиальное различие между первичными и обратными стримерами состоит в том, что первичные распространяются в практически нейтральном газе, а обратные — в каналах с плотностью свободных электронов $n_e \approx 10^{12}–10^{13} \text{ см}^{-3}$, созданных прошедшими первичными стримерами. Возможный механизм инициирования обратных стримеров/ВИ обсуждался, например, в [21, 26] и ссылках в них с точки зрения теории распространения электромагнитных сигналов в передающих линиях. Так, в [26] сделан вывод о том, что чем больше начальная плотность электронов перед фронтом ВИ, тем больше волна становится похожей на электромагнитную, движущуюся по передающей линии с распределенными параметрами. В нашей установке (рис. 1) линия такого типа образована пластиной 1, токонесущей шиной под ней и плазмой, созданной первичными стримерами вблизи керамической пластины 1. Численные оценки в [26] показали, что механизм становится значимым уже при плотности электронов $n_e \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Он может объяснить и более высокую скорость обратных стримеров, и частично скачок скорости вблизи электрода 3 в наших экспериментах, поскольку, как следует из опытов [26, 27] и показано в [21, 22], скорость стримера может сильно зависеть от плотности электронов n_e впереди его фронта (а обратные стримеры движутся в сторону

и повышенной плотности n_e , и более высокого потенциала $U(x, t)$), а заземленный электрод является короткозамкнутой нагрузкой линии, от которой сигнал отражается с полной амплитудой. Скачок скорости на электроде 3 в Хе оказался в 1.5–2 раза больше аналогичного в Не и достигает 11 раз (рис. 3 б) — величины, слишком высокой для классической передающей линии, что ставит под сомнение доминирующую роль волноводного механизма происхождения обратных стримеров [26]. При таком механизме амплитуда отраженной волны должна зависеть от величины сопротивлений нагрузки и волновой линии, а окружающий линию газ может проявляться лишь незначительно в толщине плазменного слоя.

Приведенные результаты экспериментов показывают степень аналогии в динамике поверхностных стримеров в Не и Хе при всем различии их ионизационно-транспортных характеристик. Но сопоставления характеристик даже двух газов недостаточно для идентификации механизма образования обратных стримеров, необходимы дополнительные эксперименты, в первую очередь с варьируемой нагрузкой линии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты экспериментального измерения скорости распространения поверхностных разнополярных стримеров при скользящем разряде в Хе атмосферного давления и их сопоставления с данными Не из аналогичных экспериментов. Многостримерный разряд генерируется на поверхности Al_2O_3 -керамики между лежащими на ней плоскопараллельными электродами путем подачи униполярного импульса электрического потенциала в виде ступеньки амплитудой 2.9–3.2 кВ или 4–4.5 кВ с фронтом нарастания 40 нс на один из электродов. Измерения выполнены в режиме однократных импульсов при переключаемой полярности питания в семи разных участках вдоль разрядного промежутка. Эксперименты с Хе показали, аналогично предшествующим с Не, что в течение одного импульса разряда в промежутке распространяются стримеры двух типов: первичные, всегда развивающиеся от высоковольтного электрода к заземленному, и обратные, берущие начало на заземленном электроде после прихода туда первичных стримеров и распространяющиеся в обратном направлении. Скорость первичных стримеров экспоненциально уменьшается по мере их движения в промежутке с очень близким и даже равным декрементом

затухания в двух газах. Обратные стримеры начинают движение со скоростью, до 11 раз превышающей скорость первичных стримеров вблизи заземленного электрода, и далее по ходу движения их скорость продолжает монотонно увеличиваться. Измеренные величины скорости стримеров обоих типов максимальны вблизи высоковольтного электрода и достигают $(4-9) \cdot 10^7$ см/с в зависимости от полярности разряда и амплитуды потенциала высоковольтного электрода.

Экспоненциальное уменьшение скорости движения первичных стримеров в промежутке качественно не противоречит результатам других работ. Изменения скорости обратных стримеров при движении в Хе и Не не следуют строго экспоненциальной зависимости, значительно различаются и не находят детального обоснования в рамках полученных данных. Большой скачок скорости вблизи заземленного электрода ставит под сомнение доминирующую роль обсуждавшегося ранее волноводного механизма их инициирования. Для уточнения его роли целесообразны эксперименты с варьируемой нагрузкой вблизи заземленного электрода разрядной камеры.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Vollrath and G. Thomer, *High-Speed Physics*, Springer-Verlag, Wien, New York (1967), Vol. 1 [К. Фольрат, Г. Томер, *Физика быстротекущих процессов*, Мир, Москва (1971), т. 1, с. 135].
2. L. M. Vasilyak, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, and I. V. Filyugin, *Sov. Phys. Usp.* **37**, 247 (1994) [Л. М. Василяк, С. В. Костюченко, Н. Н. Кудрявцев, И. В. Филюгин, *УФН* **164**, 263 (1994)].
3. V. M. Borisov and O. B. Khristoforov, in *Encyclopedia of Low-Temperature Plasma*, ed. by V. E. Fortov, Nauka/Interperiodika, Moscow (2000), Introductory Vol., Part II, p. 350 [В. М. Борисов, О. Б. Христофоров, в сб. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*, под ред. В. Е. Фортова, Наука/Интерпериодика, Москва (2000), вводный том, разд. II, с. 350].
4. V. I. Gibalov and G. J. Pietsch, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 024010 (2012).
5. R. Brandenburg, *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 053001 (2017).
6. N. Yu. Babaeva and G. V. Naidis, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54**, 223002 (2021).
7. I. K. Krasnyuk, N. I. Lipatov, and P. P. Pashinin, *Sov. J. Quantum Electron.* **6**, 1298 (1976) [И. К. Красюк, Н. И. Липатов, П. П. Пашинин, *Квант. электрон.* **3**, 2384 (1976)].
8. S. I. Andreev, E. A. Zobov, and A. N. Sidorov, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **19**, 309 (1978) [С. И. Андреев, Е. А. Зобов, А. Н. Сидоров, *ПМТФ* **3**, 38 (1978)].
9. V. M. Borisov, F. I. Vysikailo, and O. B. Khristoforov, *High Temp.* **21**, 635 (1983) [В. М. Борисов, Ф. И. Высикайло, О. Б. Христофоров, *ТВТ* **21**, 844 (1983)].
10. V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, F. I. Vysikailo, and O. B. Khristoforov, *High Temp.* **22**, 528 (1984) [В. Ю. Баранов, В. М. Борисов, Ф. И. Высикайло, О. Б. Христофоров, *ТВТ* **22**, 661 (1984)].
11. R. E. Beverly III, *J. Appl. Phys.* **60**, 104 (1986).
12. K. K. Trusov, *Appl. Opt.* **33**, 949 (1994).
13. K. K. Trusov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32**, 845 (1999).
14. R. Sosa, H. Kelly, D. Grondona, A. Márquez, V. Lago, and G. Artana, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 035202 (2008).
15. K. K. Trusov, *Plasma Phys. Rep.* **38**, 382 (2012) [К. К. Трусов, *Физика плазмы* **38**, 419 (2012)].
16. K. K. Trusov, *Plasma Phys. Rep.* **40**, 739 (2014) [К. К. Трусов, *Физика плазмы* **40**, 842 (2014)].
17. K. K. Trusov, *Plasma Sources Sci. Technol.* **27**, 095009 (2018).
18. K. K. Trusov, *Phys. Plasmas* **32**, 073508 (2025).
19. K. K. Trusov, *Phys. Plasmas* **30**, 083501 (2023).
20. K. K. Trusov, *J. Appl. Phys.* **139**, 063303 (2026).
21. E. I. Asinovskii, L. M. Vasilyak, and V. V. Markovets, *High Temp.* **21**, 371 (1983) [Э. И. Асиновский, Л. М. Василяк, В. В. Марковец, *ТВТ* **21**, 577 (1983)].
22. Yu. Z. Ionikh, *Plasma Phys. Rep.* **46**, 1015 (2020) [Ю. З. Ионих, *Физика плазмы* **46**, 928 (2020)].
23. J. R. Fuhr and W. L. Wiese, *NIST Atomic Transition Probability Tables*, in *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, ed. by D. R. Lide, 77th ed., CRC Press, Boca Raton (1996).
24. K. K. Trusov, *Plasma Phys. Rep.* **47**, 1049 (2021) [К. К. Трусов, *Физика плазмы* **48**, 54 (2022)].

25. K. K. Trusov, Plasma Phys. Rep. **48**, 682 (2022)
[K. K. Трусов, Физика плазмы **48**, 565 (2022)].
26. W. P. Winn, J. Appl. Phys. **38**, 783 (1967).
27. T. Suzuki, J. Appl. Phys. **48**, 5001 (1977).

Propagation Velocity of the Oncoming Streamers of Opposite to Each Other Polarity under a Sliding Discharge in Xe

*K. K. Trusov**

P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
119991, Moscow, Russia

* E-mail: trusovkk@lebedev.ru

Received May 09, 2026

Revised June 04, 2026

Accepted June 05, 2026

Abstract

Experimental measurements of the oncoming streamers' velocity in atmospheric pressure Xe propagating over the surface of a dielectric plate under a sliding discharge initiated by single step-like unipolar voltage pulses of 2.9–3.2 kV positive or 4–4.5 kV negative polarity with a rise time of 40 ns and duration greater than 30 μ s have been conducted. The measurements were carried out on a setup that had previously been used in similar experiments with Ne, using a technique based on measuring the delay time of streamer head light emission in seven different locations of an 11.6-cm-long discharge gap. The following are shown: an exponential decrease in the velocity of primary streamers as they pass through the gap; an upward velocity jump of up to 11 times near the grounded electrode during the transformation of primary streamers into reverse ones; and a monotonous increase in the velocity of reverse streamers as they propagate through the gap, which differs from the exponential dependency. The results are discussed and compared with similar Ne data obtained from previous experiments.

Keywords: sliding discharge, counter-propagating streamers, streamer velocity, ionization wave, noble gases, xenon

Funding. The study was not sponsored.

Conflict of interest. The author declares that he has no conflicts of interest.