

Измерение динамического тока смещения – новый способ исследования динамики формирования стримера при пробое газов высокого давления

Д. В. Белоплотов⁺¹⁾, М. И. Ломаев^{+*}, В. Ф. Тарасенко^{+*}, Д. А. Сорокин⁺

⁺Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, 634055 Томск, Россия

^{*}Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

Поступила в редакцию 27 февраля 2018 г.

После переработки 23 марта 2018 г.

Проведены исследования динамики формирования стримеров в промежутке “острие–плоскость”, заполненном воздухом атмосферного давления. Показано, что временной ход динамического тока смещения, измеряемого токовым шунтом либо коллектором, расположенным за сетчатым электродом, определяется темпом изменения формы и размеров стримера. Если на осциллограммах динамического тока смещения наблюдается один пик, то это означает, что в промежутке формировался шарообразный стример, который не успел пересечь его за время существования напряжения. При наличии двух пиков на осциллограммах динамического тока смещения шарообразный стример пересекает промежуток и достигает противоположного электрода. При этом шарообразный стример обычно трансформируется в цилиндрический. Показано, что измерение динамического тока смещения позволяет определять временной ход напряженности электрического поля вблизи плоского электрода.

DOI: 10.7868/S0370274X18100041

Введение. Низкотемпературная неравновесная плазма привлекает в настоящее время значительное внимание как с точки зрения исследования ее фундаментальных свойств, так и возможности ее практического использования [1–4]. Известно, что при повышенных давлениях газов и перенапряжениях в единицы–десятки процентов реализуется стримерный механизм пробоя [5–9]. В этих условиях при однородном распределении электрического поля стример представляет собой тонкий (~ 100 мкм) слабоионизованный цилиндрический канал. Исследованию стримеров посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ [10–20].

При перенапряжении в десятки раз, которое легко достичь в промежутке с неоднородным распределением напряженности электрического поля (например, “острие–плоскость”) при подаче на него высоковольтных (10–100 кВ) импульсов напряжения наносекундной и субнаносекундной длительности, формируется стример, поперечные размеры которого сопоставимы с межэлектродным расстоянием [15, 16, 21–23]. Формирование таких стримеров подтверждается результатами теоретических работ [14, 16, 24, 25].

Одной из основных особенностей формирования стримера при высоких перенапряжениях является генерация заметного числа высокоэнергетичных (убегающих) электронов [21, 23, 26–29]. В этих условиях при $dU/dt \sim 3 \cdot 10^{13}$ В/с и обеих полярностях высоковольтного электрода с малым радиусом кривизны были зарегистрированы стримеры в форме шара, а также был предложен механизм их формирования [23]. Кроме того, в экспериментах по исследованию диффузного разряда, формируемого в условиях генерации убегающих электронов при высоких перенапряжениях, в [27] было установлено, что при движении стримера (волны ионизации) токовым шунтом регистрируется ток смещения, обусловленный быстрым ($\sim 10^8$ – 10^9 см/с) перемещением фронта плазмы по промежутку. Для определенности он был назван динамическим током смещения. Однако из-за быстротечности процессов ионизации в данных условиях подробные экспериментальные исследования динамического тока смещения не проводились. Поэтому в настоящей работе были выбраны пороговые для пробоя промежутка условия, что позволило исследовать динамику формирования стримеров в резко неоднородном электрическом поле с одновременной регистрацией динамического тока смещения с высоким временным разрешением.

¹⁾e-mail: rff.qep.bdim@gmail.com

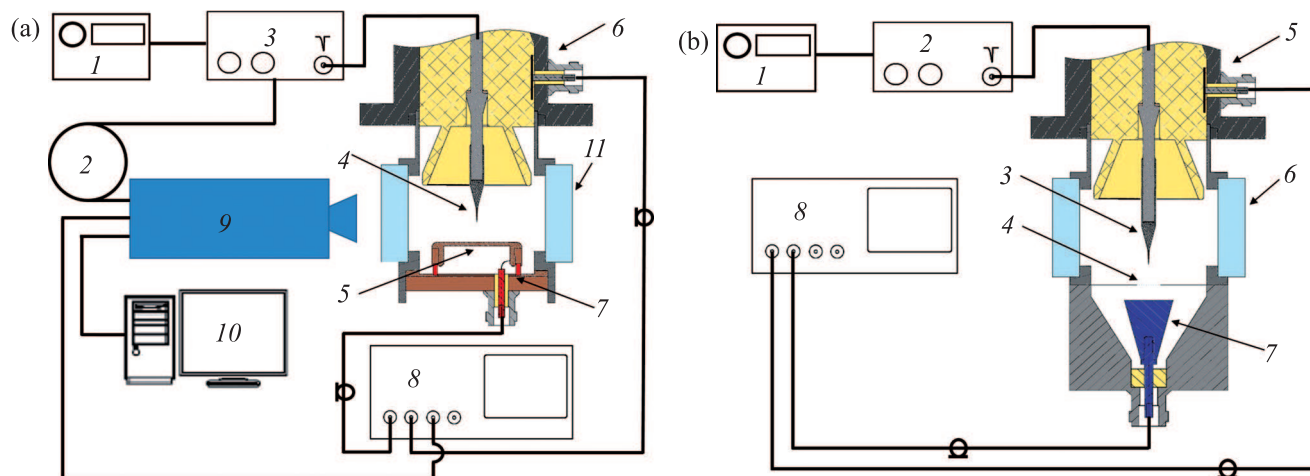


Рис. 1. (Цветной онлайн) (а) – Схема экспериментальной установки для исследования формирования стримера с помощью четырехканальной ICCD камеры: 1 – генератор запуска, 2 – линия задержки, 3 – высоковольтный генератор ГИН-50-1, 4 – игла-анод, 5 – заземленный электрод, 6 – емкостный делитель напряжения, 7 – токовый шунт на чип-резисторах, 8 – осциллограф, 9 – ICCD камера, 10 – компьютер. (б) – Схема экспериментальной установки для регистрации динамического тока смещения с высоким временным разрешением: 1 – генератор запуска, 2 – высоковольтный генератор ГИН-50-1, 3 – игла-анод, 4 – заземленный электрод (медный диск с отверстием диаметром 10 мм, которое было закрыто сеткой), 5 – емкостный делитель напряжения, 6 – кварцевое окно; 7 – коллектор, 8 – осциллограф

Цель данной работы – посредством измерения динамического тока смещения, а также с помощью высокоскоростной съемки исследовать формирование стримеров в резко неоднородном электрическом поле в пороговых для пробоя условиях.

Экспериментальная установка и методики измерений. Эксперименты проводились на двух установках, схемы которых представлены на рис. 1. Установка включала газоразрядную камеру, высоковольтный генератор ГИН-50-1 [30], четырехканальную ICCD камеру HSFC-PRO, цифровой осциллограф. Генератор ГИН-50-1 формировал импульсы напряжения положительной полярности регулируемой амплитуды с длительностью фронта $\tau_{0.1-0.9} \approx 2$ нс и длительностью на полувысоте $\tau_{0.5} \approx 13$ нс. Импульсы напряжения подавались на промежуток по высоковольтному коаксиальному кабелю длиной 3 м. Высоковольтный электрод (анод) был изготовлен из швейной иглы длиной 5 мм, диаметром основания 1 мм и радиусом закругления кончика иглы 75 мкм. Заземленный электрод (катод) был плоским. Расстояние между электродами составляло 8.5 мм. Камера оснащена емкостным делителем напряжения и токовым шунтом, собранном на чип-резисторах для измерения, соответственно, напряжения и тока. Сигналы с этих датчиков регистрировались цифровым осциллографом Tektronix TDS3054B (500 МГц, 5 ГСэ/с). Излучение в промежутке регистрировалось с разрешением во времени с помощью четы-

рехканальной ICCD камеры HSFC-PRO. Причем за один импульс осуществлялись регистрация излучения ICCD камерой и регистрация импульсов напряжения и тока. Синхросигнал с первого канала ICCD камеры, который сигнализировал о включении канала, также регистрировался осциллографом. Это позволило осуществить привязку изображений с ICCD камеры к осциллограммам напряжения и тока.

В отдельной серии экспериментов осуществлялась регистрация динамического тока смещения, вызванного перераспределением напряженности электрического поля в промежутке при формировании и распространении стримера. Для этой цели заземленный плоский электрод был изготовлен в виде диска с отверстием в центре диаметром 10 мм (рис. 1б). Это отверстие закрывала сетка с размером ячейки 1×1 мм и пропусканием 67%. В результате электрическое поле частично проникало наружу. Изменение этого поля, вызванное движением стримера, регистрировалось коллектором, который обычно применяется для регистрации тока убегающих электронов при отрицательной полярности острейного электрода [21, 23, 26–29]. Временное разрешение коллектора составляет 80 пс [26–29]. Сигналы с коллектора и емкостного делителя напряжения в этой серии экспериментов регистрировались цифровым осциллографом KeySight MSOS804A (8.4 ГГц, 20 ГСэ/с, 10-bit ADC). Газоразрядная камера откачивалась и затем запол-

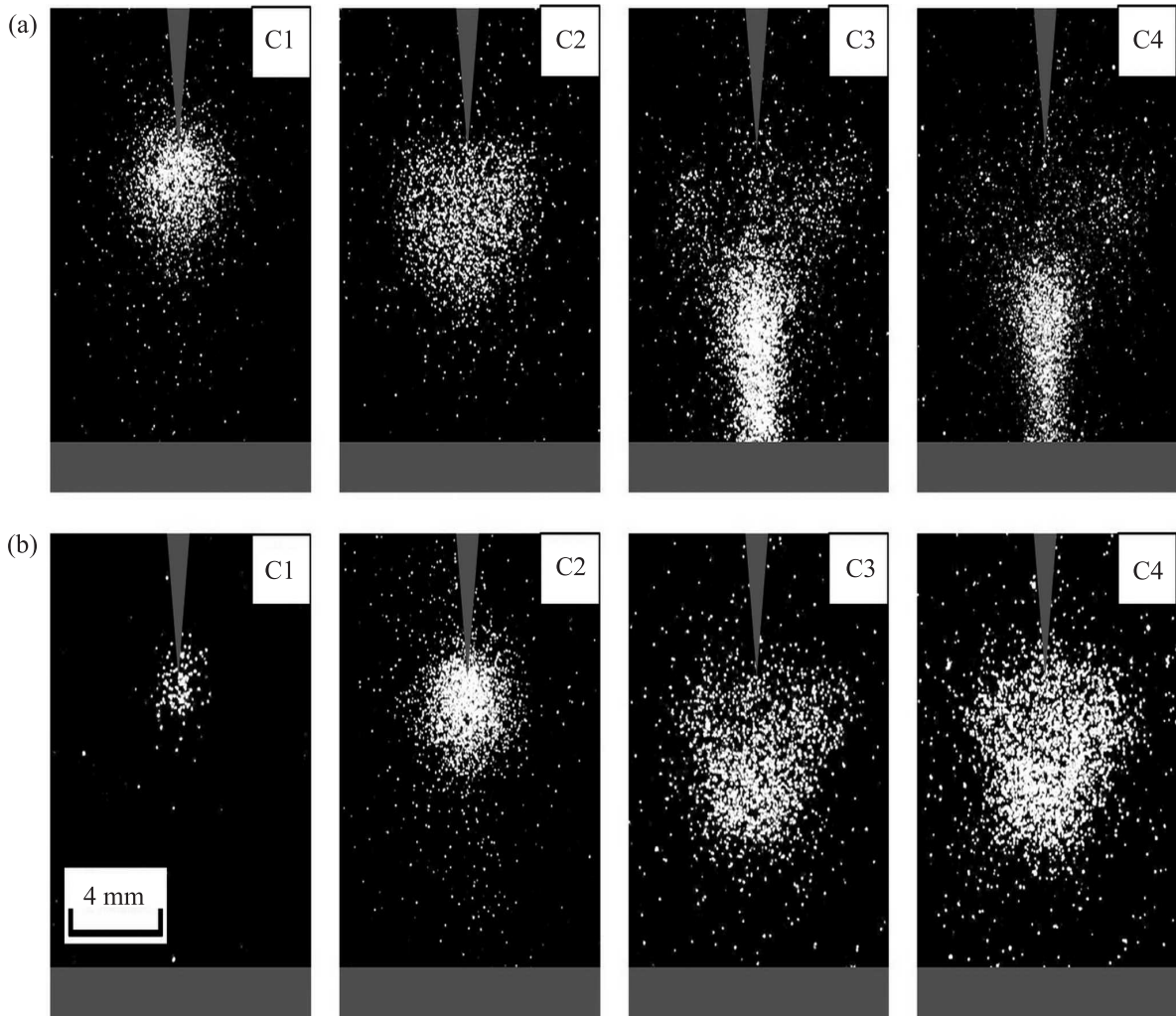


Рис. 2. Изображения свечения стримера в воздухе атмосферного давления. (а) – Случай, когда стример пересек промежуток за время, в течение которого к промежутку было приложено напряжение. (б) – Случай, когда стример не успел пересечь промежуток. С1, С2, С3, С4 – номера каналов ICCD камеры (моменты их включения показаны на осциллограммах, представленных на рис. 3)

нялась воздухом с влажностью не более $\approx 30\%$ до давления 100 кПа.

Результаты и их обсуждение. Минимальное значение напряжения на промежутке, при котором в нем наблюдалось формирование стримера как посредством ICCD камеры, так и посредством регистрации тока, составило 14 кВ. Формирующийся в этих условиях катодонаправленный стример вблизи острия имел форму шара. В зависимости от того, в какой момент времени относительно начала импульса напряжения стартовал стример, он мог либо пересечь промежуток, либо не успеть это сделать. При этом в случае замыкания промежутка шаровой стример трансформировался в цилиндрический вблизи катода. Примеры таких реализаций представлены на рис. 2.

В спектре излучения разряда доминируют полосы $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ перехода молекулы азота. Уменьшение со временем интенсивности свечения вблизи острия обусловлено относительно коротким эффективным временем жизни молекул азота в возбужденном $C^3\Pi_u$ -состоянии, которое составляет 1 нс при атмосферном давлении азота [28].

Осциллограммы напряжения и тока, соответствующие рис. 2, представлены на рис. 3. Видно, что для случая рис. 2b стример начал формироваться через 7–8 нс относительно начала импульса напряжения. Обращает на себя внимание тот факт, что на осциллограмме тока наблюдается короткий импульс в момент начала процессов ионизации вблизи острия. Данный импульс – это динамический ток смещения [29], обусловленный быстрым перераспределени-

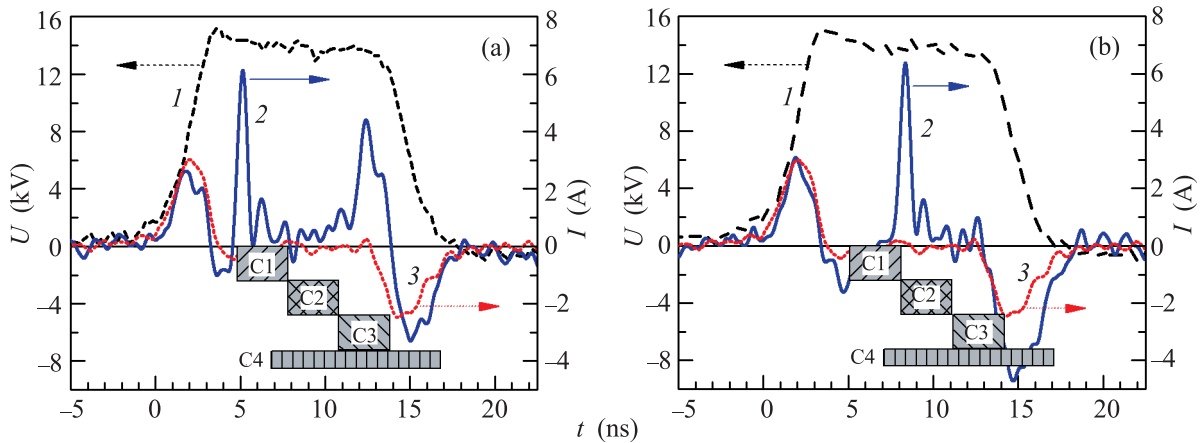


Рис. 3. (Цветной онлайн) (а) – Осциллограммы для случая, когда стример пересек промежутков. (б) – Осциллограммы для случая, когда стример не успел пересечь промежутков. 1 – напряжение, 2 – ток, регистрируемый токовым шунтом, 3 – ток смещения, вычисленный из произведения dU/dt на значение емкости газоразрядного промежутка C_{gap} . C1, C2, C3, C4 – номера каналов ICCD камеры. Ширина и местоположение заштрихованных прямоугольников соответствует экспозиции и моментам включения каналов ICCD камеры

ем напряженности электрического поля вследствие “взрывообразного” развития процессов ионизации газа вблизи острия. Высокие темпы ионизационных процессов объясняются высоким значением напряженности электрического поля вблизи кончика иглы. Электрод данной формы был специально использован в эксперименте на основании наших предварительных исследований. Расчет распределения напряженности электрического поля для используемой в эксперименте геометрии газоразрядного промежутка показывает, что при напряжении на промежутке 15 кВ напряженность электрического поля вблизи поверхности кончика иглы достигает ≈ 1 МВ/см. Вблизи плоского электрода напряженность электрического поля составляет ≈ 4 кВ/см.

На рис. 2 видно, что формирующийся стример вначале имеет форму шара. Отметим, что авторы работ [11–13] называют подобное плазменное образование *inception cloud*. По мере увеличения размеров шарообразного стримера геометрический фактор, определяющий усиление поля, уменьшается, напряженность электрического поля на фронте стримера относительно быстро убывает и, следовательно, процессы ионизации замедляются. В результате скорость перемещения фронта стримера существенно падает, а это ведет к уменьшению скорости перераспределения напряженности электрического поля в промежутке, т.е. величина dE/dt становится меньше. Необходимо отметить, что токовый шунт регистрирует изменение напряженности электрического поля вблизи плоского электрода, значение которой растет по мере сокращения расстояния между фрон-

том стримера и плоским электродом. Скорость роста напряженности электрического поля также меняется в соответствии со скоростью фронта стримера. Поэтому величина регистрируемого динамического тока смещения изменяется, что позволяет регистрировать динамику развития стримера с высоким временным разрешением. В данной работе было впервые установлено, что при наличии на осциллограммах динамического тока смещения одного пика формируется шарообразный стример, который останавливается в промежутке, не успев пересечь его за то время, пока существует напряжение на промежутке. Если наблюдаются два пика, это значит, что стример пересек промежутков. При этом шарообразный стример трансформируется в цилиндрический вблизи катода. С этого момента времени в промежутке протекает ток проводимости, а также ток смещения (емкостный ток $C \cdot dU/dt$) в обратном направлении, обусловленный спадом напряжения на промежутке. Отметим, что два пика на осциллограмме динамического тока смещения регистрируются при увеличении напряжения на промежутке. В этом случае скорость продвижения шарового стримера увеличивается, и он, не трансформируясь в цилиндрический, достигает противоположного электрода.

Для случая, когда стример не успел пересечь промежутков (рис. 2б), ток смещения (емкостный ток $C \cdot dU/dt$), протекающий во время спада напряжения на промежутке, в ≈ 2 раза превышал ток смещения при отсутствии плазмы в промежутке (рис. 3б, кривые 2 и 3, временной интервал 13–17 нс). Это указывает на увеличение в ≈ 2 раза емкости промежутка.

Как видно из рис. 2а (изображения с каналов С3 и С4), в финальной стадии стример имеет значительно меньшие поперечные размеры, чем в начале и приобретает форму цилиндра. Это обусловлено как уменьшением напряженности электрического поля на фронте шарового стримера при достижении им наибольшего размера, так и низкой напряженностью электрического поля вблизи катода.

Импульс динамического тока смещения I'_{displ} , регистрируемый токовым шунтом в момент “взрывообразного” начала процессов ионизации газа вблизи острия можно рассчитать как произведение напряжения на скорость изменения емкости газоразрядного промежутка, которое вызвано появлением плазмы на аноде – $U \cdot dC/dt$. Оценку величины dC/dt можно провести, зная емкость промежутка C_{gap} без плазмы, и емкость промежутка C'_{gap} в случае, когда анод покрыт высокопроводящей плазмой. Примерные размеры этой плазмы можно определить из рис. 2. Так, для расчета C'_{gap} радиус плазменного образования принимался равным ~ 1 мм. Стоит отметить, что при расчете необходимо учитывать только ту емкость, которая образована высоковольтным и заземленным электродами. Расчет показал, что $C_{\text{gap}} = 5 \cdot 10^{-13}$ Ф, а $C'_{\text{gap}} = 5.5 \cdot 10^{-13}$ Ф. Время, за которое происходит изменение емкости, было взято равным порядка 100 пс (по данным регистрации динамического тока смещения коллектором с высоким временным разрешением, представленным ниже). Напряжение на промежутке в момент начала процессов ионизации составляет ≈ 14 кВ. В результате $I'_{\text{displ}} \approx 7$ А, что подтверждает проведенные измерения.

На рис. 4 представлены осциллограммы напряжения и динамического тока смещения, регистрация которого осуществлялась с помощью коллектора, установленного за сеткой в плоском электроде (рис. 1б), с применением осциллографа, имеющего большую (8.4 ГГц) полосу пропускания, чем в предыдущей серии экспериментов (500 МГц). На рис. 4 также представлены расчетные зависимости $E_c(t) = (\varepsilon \cdot \varepsilon_0)^{-1} \cdot \int j_{\text{displ}}(t) dt$, где $E_c(t)$ – напряженность электрического поля вблизи катода, ε – диэлектрическая проницаемость воздуха, ε_0 – диэлектрическая постоянная, $j_{\text{displ}}(t)$ – плотность тока смещения. Значения $j_{\text{displ}}(t)$ брались в относительных единицах. Значения $E_c(t)$ калибровались по данным расчета распределения напряженности электрического поля в данном газоразрядном промежутке без плазмы, что соответствует кривым 4 на рис. 4б,с. При амплитуде импульса напряжения 16.3 кВ напряженность электрического поля

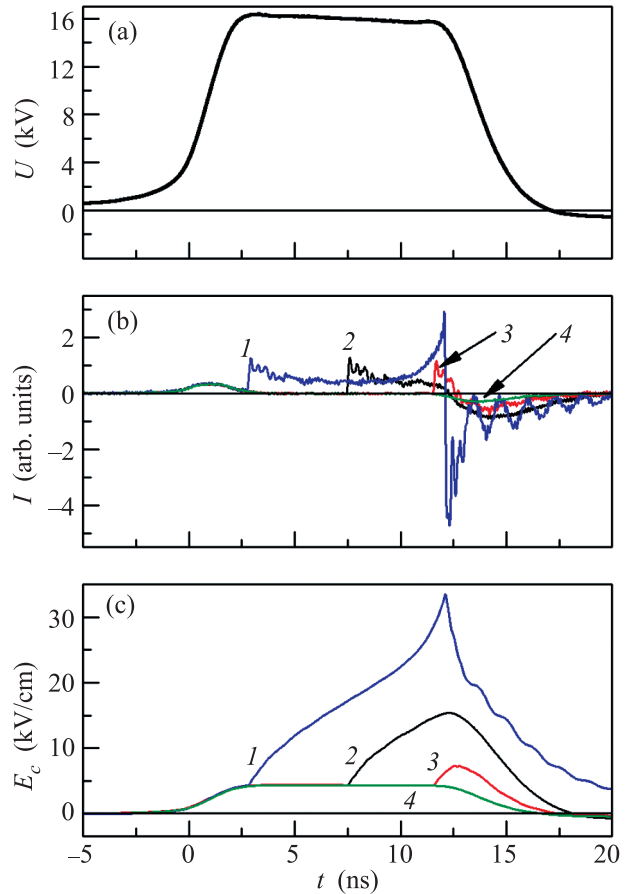


Рис. 4. (Цветной онлайн) Осциллограммы импульсов напряжения (а) и динамического тока смещения, регистрация которого осуществлялась коллектором (б). (с) – $E_c(t)$ при различных вариантах развития стримера. 1 – стример пересек промежутков; 2, 3 – стример не пересек промежутков; 4 – режим холостого хода

вблизи поверхности плоского электрода составляет 4.3 кВ/см.

Расчетные кривые на рис. 4с показывают изменение напряженности электрического поля вблизи поверхности плоского электрода. Из полученных данных следует, что в режиме холостого хода (рис. 4с, кривая 4) временной ход $E_c(t)$ в точности повторяет импульс напряжения. В тех случаях, когда газ вблизи острейного электрода начинает ионизоваться, напряженность электрического поля вблизи плоского электрода резко нарастает, что обусловлено, как отмечено выше, быстрым перераспределением поля в промежутке. Время, за которое происходит перераспределение поля, можно оценить по данным рис. 4б. Длительность фронта импульса динамического тока смещения составляет для всех трех кривых ≈ 100 пс. По мере формирования шарообразного стримера $E_c(t)$ растет (рис. 4с, кривые 1–3).

Кривая 1 рис. 4с соответствует случаю, когда стример за время импульса успевает пересечь промежуток. Видно, что перед “касанием” катода стримером $E_c(t)$ нарастает с увеличивающейся скоростью. Максимум $E_c(t)$ составляет ≈ 33.5 кВ/см, что несколько выше порога пробоя воздуха при атмосферном давлении – 32 кВ/см [8]. Таким образом, пробой в этой части промежутка происходит в условиях малого перенапряжения. Этим объясняется уменьшение поперечных размеров стримера вблизи плоского электрода (см. рис. 2). Увеличение скорости нарастания напряженности электрического поля (рис. 4б, кривая 1) указывает на ускорение стримера перед “касанием” катода. После того, как газ вблизи катода ионизовался, напряженность электрического поля резко падает. Кроме того, к этому моменту времени заканчивается импульс напряжения. Колебания на спадающей части $E_c(t)$ после “касания” стримером катода, как мы полагаем, могут быть обусловлены распространением волн ионизации в ионизованном газе в обратном и прямом направлениях, пока напряженность электрического поля достаточна для этого процесса. Такие колебания не наблюдаются, если стример не пересек промежуток (рис. 4с, кривые 2, 3). Волны ионизации в ионизованном газе возникают из-за наличия градиентов концентрации электронов.

Полученные данные также позволяют достаточно точно оценить среднюю по промежутку скорость стримера. Из представленной на рис. 4б кривой 1 можно точно определить моменты старта стримера и “касания” им катода. Так, значение средней скорости стримера для данного случая составило $9 \cdot 10^7$ см/с. В общем случае, средняя скорость стримера от импульса к импульсу меняется в диапазоне от $7 \cdot 10^7$ до $11 \cdot 10^7$ см/с.

Как показывают результаты эксперимента, измерения достаточно простым способом динамического тока смещения дают возможность определять временной ход напряженности электрического поля вблизи плоского электрода, исследовать особенности формирования стримера, а также оценивать его среднюю скорость. В будущих исследованиях мы намерены применить данный метод для большего диапазона условий (амплитуда напряжения, полярность, давление и род газа и т.д.).

Выводы. При исследовании формирования катодонаправленного стримера в резко неоднородном электрическом поле в атмосферном воздухе в пороговых для пробоя условиях с помощью четырехканальной ICCD камеры, а также посредством регистрации динамического тока смещения были полу-

чены следующие результаты. Ионизация газа вблизи острейшего электрода (анод) носит “взрывообразный” характер, что обусловлено высокой напряженностью электрического поля в этой части промежутка. Вблизи анода формируется стример в форме шара, фронт которого движется к катоду. В результате этого происходит перераспределение напряженности электрического поля в промежутке, что обуславливает протекание динамического тока смещения. Измерение динамического тока смещения позволяет исследовать особенности формирования стримера, оценивать напряженность электрического поля вблизи заземленного плоского электрода, а также с высокой точностью оценивать среднюю скорость стримера.

В зависимости от того, когда относительно начала импульса напряжения стартовал стример, он мог пересечь либо не пересечь промежуток. В случаях, когда стример пересекает промежуток его скорость увеличивается во второй половине промежутка по мере его приближения к катоду. При этом поперечные размеры стримера уменьшаются, а его форма становится близкой к цилиндрической. Уменьшение поперечных размеров стримера обусловлено низкой напряженностью электрического поля в этой части промежутка и на фронте стримера.

Полученные результаты позволяют считать, что измерение динамического тока смещения является новым способом изучения динамики формирования стримера при пробое газов высокого давления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект # 17-72-20072).

1. *Low Temperature Plasma. Fundamentals, Technologies, and Techniques*, ed. by R. Hippler, H. Kersten, M. Schmidt, and K.H. Schoenbach, 2-nd edn., WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim (2008).
2. *Low Temperature Plasma Technology*, ed. by C. Paul K., L. XinPei, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton (2014).
3. R. Brandenburg, P.J. Bruggeman, and S.M. Starikovskaia, *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 020201 (2017).
4. I. Adamovich, S.D. Baalrud, A. Bogaerts et al. (Collaboration), *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 323001 (2017).
5. Л. Леб, *Основные процессы электрических разрядов в газах*, пер. с англ., Гостехиздат, М., Л. (1950) [L. B. Loeb, *Fundamental Processes of Electrical Discharge in Gases*, John Wiley & Sons, N.Y. (1937)].
6. Г. Петер, *Электронные лавины и пробой в газах*, пер. с англ., Мир, М. (1968) [H. Raether, *Electron*

- Avalanches and Breakdown in Gases*, Butterworth, London (1964)].
7. Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц, *Физика импульсного пробоя газов*, Наука, М. (1991).
 8. Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда*, Интеллект, Долгопрудный (2009).
 9. Э. Д. Лозанский, О. Б. Фирсов, *Теория искры*, Атомиздат, М. (1975).
 10. N. Yu. Babaeva and G. V. Naidis, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26**, 41 (1998).
 11. A. Rocco, U. Ebert, and W. Hundsdorfer, *Phys. Rev. E* **66**, 035102 (2002).
 12. T. M. P. Briels, E. M. van Veldhuizen, and U. Ebert, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36**, 908 (2008).
 13. T. M. P. Briels, J. Kos, G. J. J. Winands, E. M. van Veldhuizen, and U. Ebert, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 234004 (2008).
 14. N. Yu. Babaeva and G. V. Naidis, *Phys. Plasmas* **23**, 083527 (2016).
 15. P. Tardiveau, N. Moreau, S. Bentaleb, C. Postel, and S. Pasquiers, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 175202 (2009).
 16. P. Tardiveau, L. Magne, E. Marode, K. Ouaras, P. Jeanney, and B. Bournonville, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 054005 (2016).
 17. D. Wang, M. Jikuya, S. Yoshida, T. Namihira, S. Katsuki, and H. Akiyama, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35**, 1098 (2007).
 18. A. A. Kulikovskiy, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33**, 1514 (2000).
 19. S. V. Pancheshnyi, S. M. Starikovskaia, and A. Yu. Starikovskii, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34**, 105 (2001).
 20. G. J. J. Winands, Z. Liu, A. J. M. Pemen, E. J. M. van Heesch, and K. Yan, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 234001 (2008).
 21. E. H. Baksht, A. G. Burachenko, I. D. Kostyrya, M. I. Lomaev, D. V. Rybka, M. A. Shulepov, and V. F. Tarasenko, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 185201 (2009).
 22. A. Yu. Starikovskiy, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39**, 2602 (2011).
 23. Д. В. Белоplotов, В. Ф. Тарасенко, Д. А. Сорокин, М. И. Ломаев, *Письма в ЖЭТФ* **106**, 627 (2017).
 24. G. V. Naidis, V. F. Tarasenko, N. Yu. Babaeva, and M. I. Lomaev, *Plasma Sources Sci. Technol.* **27**, 013001 (2018).
 25. N. Yu. Babaeva and G. V. Naidis, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **44**, 899 (2016).
 26. В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, Д. В. Белоplotов, А. Г. Бураченко, И. Д. Костыря, М. И. Ломаев, Д. В. Рыбка, Д. А. Сорокин, *Письма в ЖЭТФ* **102**, 388 (2015).
 27. *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges*, ed. by V. F. Tarasenko, Nova Science Publishers. Inc, N.Y. (2014).
 28. M. I. Lomaev, D. V. Beloplotov, V. F. Tarasenko, and D. A. Sorokin, *IEEE Trans. Dielectrics and Electr. Insul.* **22**, 1833 (2015).
 29. T. Shao, V. F. Tarasenko, C. Zhang, A. G. Burachenko, D. V. Rybka, I. D. Kostyrya, M. I. Lomaev, E. Kh. Baksht, and P. Yan, *Rev. Sci. Instrum.* **84**, 053506 (2013).
 30. V. M. Efanov, M. V. Efanov, A. V. Komashko, A. V. Kirilenko, P. M. Yarin, and S. V. Zazoulin, *High-voltage and high-PRF FID pulse generators. In Ultra Wideband, Short pulse electromagnetics 9*, Springer, N.Y. (2010), part 5, p. 301.