Письма в ЖЭТФ, том 116, вып. 5, с. 284 – 291

Убегающие электроны при формировании положительной волны ионизации в азоте и воздухе

Д. В. Белоплотов[+1)], *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 18 июля 2022 г.
После переработки 25 июля 2022 г.
Принята к публикации 2 августа 2022 г.

Представлены результаты первых экспериментальных исследований генерации убегающих электронов (УЭ) при субнаносекундном пробое промежутка "плоскость–острие" вследствие развития положительной волны ионизации, стартующей от заземленного острийного электрода (анода). С помощью четырехканальной ICCD камеры, стрик-камеры Hamamatsu, а также оригинальной методики измерения тока смещения, вызванного появлением и движением волны ионизации, исследована генерация УЭ с привязкой к динамике волн ионизации в воздухе и азоте при давлении от 20 до 100 кПа. Импульсы тока УЭ длительностью меньше 100 пс наблюдались в воздухе при давлении 60 кПа и ниже, а в азоте – во всем диапазоне давлений. При этом в обоих газах при давлении ниже 50 кПа наблюдались двойные импульсы тока УЭ. Установлено, что генерация УЭ происходит не при старте волны ионизации вблизи острийного электрода, как можно было ожидать, а после ее прибытия на плоский катод. Энергия УЭ в этих условиях меньше напряжения пробоя в 4 и более раз. Полученные данные указывают на то, что генерация УЭ происходит в катодном слое.

DOI: 10.31857/S1234567822170049, EDN: jskkul

Введение. Сегодня генерация убегающих электронов (УЭ) в наносекундных разрядах атмосферного давления является ординарным и широко исследованным явлением [1–14], которое интересно само по себе, а также с точки зрения понимания механизмов предварительной ионизации газа перед фронтом ионизационной волны. Особенно хорошо генерация УЭ исследована в разрядах, формируемых в резко неоднородном электрическом поле. С одной стороны, это обусловлено воспроизводимостью явления в данных условиях, с другой – практическим интересом [15]. Как правило, разряд в резко неоднородном электрическом поле имеет диффузную форму как в чистых атомарных и молекулярных газах, так и в их смесях, а созданная плазма характеризуется высокой температурой электронов и низкой температурой тяжелых частиц [3]. Разряд формируется в диффузной форме в любых газах (даже в SF_6 [16]) при низких и высоких давлениях благодаря ионизирующему действию УЭ, генерируемых в предпробойной стадии разряда в области высокой напряженности электрического поля как вблизи острийного электрода, так и на фронте волны ионизации. Однако это справедливо только в случае развития анодонаправленных (отрицательных) волн ионизации. При развитии катодонаправленных (положительных) волн ионизации поток электронов направлен к аноду. Предполагается, что рентгеновское излучение, вызванное торможением УЭ, может обеспечивать предварительную ионизацию газа перед фронтом положительных волн ионизации. Однако генерация УЭ в этих условиях никем никогда не исследовалась экспериментально прямыми методами. Известно только об измерениях рентгеновского излучения различными способами без привязки к динамике субнаносекундного пробоя, а также о теоретических исследованиях [3, 14, 16–20]. В известной литературе нет достоверных данных, могут ли генерироваться УЭ в данных условиях. Какие механизмы при этом работают? Переходят ли электроны в режим убегания в высоком электрическом поле вблизи острийного анода или на фронте положительной волны ионизации? Какова их энергия? Ответы на эти вопросы важны для понимания того, как развиваются положительные волны ионизации в чистых газах. Тем не менее, разряды в резко неоднородном электрическом поле при положительной полярности имеют диффузную форму как в чистых газах, так и в смесях в широком диапазоне давлений [3, 16]. При этом существующие моде-

[1)]e-mail: rff.qep.bdim@gmail.com

ли хорошо описывают формирование таких разрядов в воздухе, где предварительная ионизация газа обеспечивается ионизацией молекул кислорода излучением молекул азота [21–27], а также при отрицательной полярности. Однако даже при формировании отрицательных волн ионизации в воздухе роль УЭ существенна [28].

В настоящем исследовании предпринята попытка зарегистрировать импульсы тока УЭ при развитии положительных волн ионизации, а также определить, когда и где генерируются УЭ. Для этого был применен новый метод исследования разряда посредством измерения тока смещения, вызванного перераспределением электрического поля при формировании плазмы [29, 30]. Известно, что изменяющееся во времени электрическое поле вызывает ток смещения. В газоразрядном промежутке токи смещения могут возникать как при изменении внешнего поля (например, при росте и спаде напряжения), так и за счет перераспределения электрического поля при появлении заряженных частиц в результате ионизации газа. Появление стримера (волны ионизации), головка которого имеет объемный заряд, служит причиной перераспределения электрического поля в промежутке. Соответственно, появляется ток смещения. Его величина зависит как от скорости волны ионизации, так и от ее геометрических размеров. Для того чтобы обозначить этот ток смещения особым образом, он был назван динамическим током смещения (ДТС). Ранее, по данным измерений ДТС вместе с током УЭ удалось установить, что УЭ могут генерироваться даже после пробоя промежутка [31, 32].

Экспериментальная установка и методики измерений. Исследования проводились на установке, показанной на рис. 1a. Газоразрядная камера оснащалась двумя передающими линиями ($Z = 75\,\text{Ом}$) со встроенными емкостными делителями напряжения. Длина одной линии составляет 1 м. Это сделало возможным измерять одновременно падающую и отраженную от промежутка волны напряжения и восстанавливать напряжение на промежутке средствами осциллографа непосредственно во время проведения эксперимента. Ток УЭ измерялся коллектором, изготовленным из коаксиального кабеля Radiolab 5D-FB PVC ($Z = 50\,\text{Ом}$). Диаметр центральной жилы кабеля составляет 1.8 мм. Конец кабеля без внешней оболочки устанавливался в металлическую трубку диаметром 6 мм, являющуюся частью заземленного электрода. Медная диафрагма диаметром 1.8 мм была впаяна в торец трубки. Расстояние между диафрагмой и концом центральной жилы кабеля составляло ≈ 1 мм. Таким образом, сигнал формировался только теми УЭ, которые двигались в направлении жилы кабеля (коллектора). Заземленный электрод был выполнен в форме усеченного конуса из сетки (пропускание 40 %) толщиной 100 мкм. Диаметры бо́льшего и меньшего основания усеченного конуса составляли 6 и 2 мм соответственно. Кромка меньшего основания усеченного конуса обеспечивала усиление напряженности электрического поля, как показано на рис. 1b, c. Расчет распределений потенциала и напряженности электрического поля производился с помощью программного обеспечения ELCUT 4.1 в двумерной осесимметричной постановке. Высоковольтный электрод был выполнен также в форме конуса из цельного куска алюминия. Диаметр бо́льшего основания конуса, обращенного к заземленному электроду, составлял 22 мм, а его кромка была скруглена. Расстояние d между электродами составляло 5 мм.

В экспериментах использовались генераторы наносекундных импульсов напряжения на основе FID-технологии [33]. Генератор ГИН-55-01 формировал на согласованную нагрузку импульсы напряжения отрицательной полярности амплитудой −37 кВ, длительностью на полувысоте 0.7 нс и временем нарастания 0.7 нс, а генератор ГИН-50-1 – импульсы напряжения положительной полярности амплитудой 12 кВ, длительностью на полувысоте 13 нс и временем нарастания 2.2 нс.

При исследовании генерации УЭ с привязкой к динамике формирования положительной волны ионизации необходимо было измерять раздельно и вместе ток УЭ и ток смещения.

Измерение только тока смещения I_{displ}. Для этого необходимо было исключить попадание УЭ на коллектор. Это обеспечивалось за счет помещения бумаги для принтера толщиной около 100 мкм перед диафрагмой коллектора. В эксперименте записывалось около 100 осциллограмм.

Измерение только тока УЭ I_{REs}. Необходимо исключить ток смещения. Для этого металлическая мелкоячеистая сетка устанавливалась в диафрагму. В эксперименте записывалось также около 100 осциллограмм.

Измерение тока УЭ и тока смещения одновременно $I_{\text{REs}} + I_{\text{displ}}$. Перебирая сетки с различным размером ячеек, были достигнуты условия, при которых ток УЭ и ток смещения были одного порядка величины. В эксперименте записывалось также около 100 осциллограмм.

Из всей совокупности данных выбирались осциллограммы с одинаковым временем запаздывания пробоя. Затем они сравнивались.

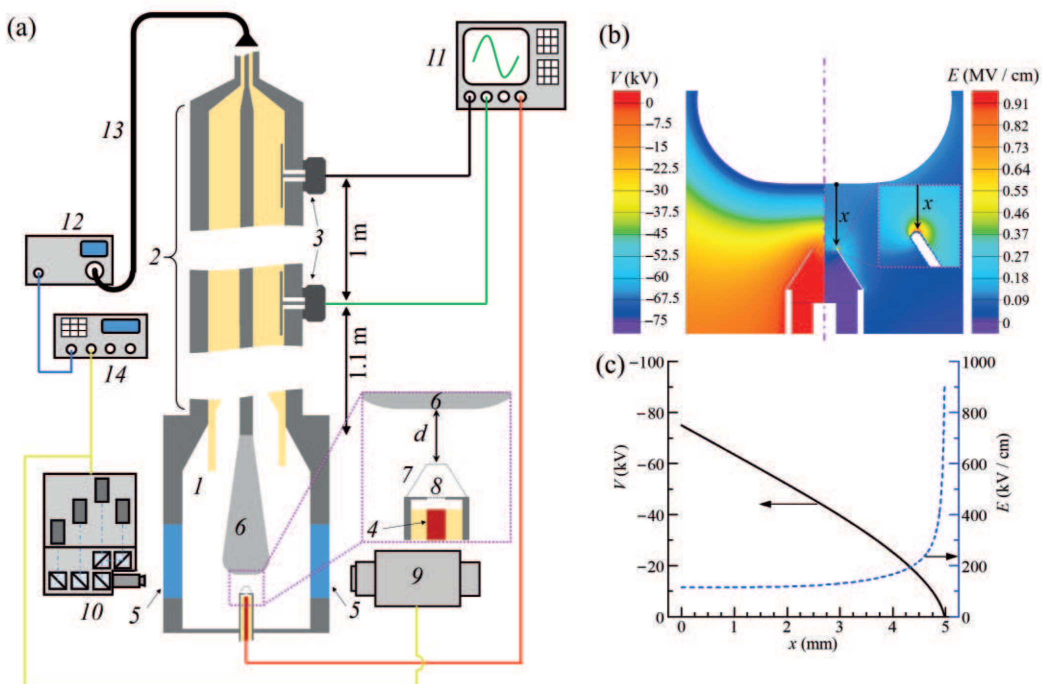

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Схема экспериментальной установки. *1* – газоразрядная камера; *2* – коаксиальная передающая линия; *3* – емкостные делители напряжения; *4* – приемная часть коллектора (жила коаксиального кабеля Radiolab 5D-FB PVC); *5* – кварцевое окно; *6* – высоковольтный электрод; *7* – заземленный электрод из сетки; *8* – диафрагма с сеткой либо с кусочком листа бумаги для принтера; *9* – стрик-камера; *10* – четырехканальная ICCD камера; *11* – осциллограф; *12* – высоковольтный генератор; *13* – высоковольтный коаксиальный кабель; *14* – генератор запускающих импульсов. (b), (c) – Распределение потенциала и напряженности электрического поля в газоразрядном промежутке

Формирование разряда исследовалось оптическими методами с применением четырехканальной ICCD камеры HSFC-PRO и стрик-камеры Hamamatsu C10910-05 во время измерения тока УЭ и тока смещения. Минимальная длительность экспозиции ICCD камеры составляет 3 нс. Однако задержка между каналами может варьироваться в диапазоне 0.2–3 нс. Входная щель стрик-камеры была ориентирована вдоль линии, перпендикулярной поверхности высоковольтного электрода и проходящей через кромку заземленного электрода. Ширина щели составляла 0.02 мм, что обеспечило временное разрешение порядка 10 пс.

Сигналы с емкостного делителя напряжения и коллектора записывались осциллографом Tektronix MSO64B (8 ГГц, 20 ГС/с).

Газоразрядная камера откачивалась форвакуумным насосом и заполнялась воздухом либо азотом. Давление варьировалось в диапазоне 20–100 кПа.

Результаты и их обсуждение. При подаче импульсов напряжения отрицательной полярности амплитудой −37 кВ, длительностью на полувысоте 0.7 нс и временем нарастания 0.7 нс на промежуток, заполненный воздухом либо азотом, наблюдался диффузный разряд во всем исследуемом диапазоне давлений. При давлении 100 кПа наблюдались отдельные диффузные каналы, но при уменьшении давления они сливались.

На рисунке 2a, b представлены изображения свечения плазмы разряда в воздухе и азоте при давлении 50 кПа в различные моменты времени, полученные с помощью четырехканальной ICCD камеры за один импульс. Изображения C1–C3 на рис. 2a, b демонстрируют формирование разряда, а изображение C4 – интегральное за импульс свечение. Видно, что плазма появляется вблизи заземленного острийного электрода (анода), где электрическое поле усилено (рис. 1a, b). Постепенно фронт плазмы перемещается в направлении плоского высоковольтного электрода. Это положительная волна ионизации. После замыкания промежутка плазмой наблюдаются диффузный разряд, катодные и анодные пятна, а также темное пространство вблизи катода.

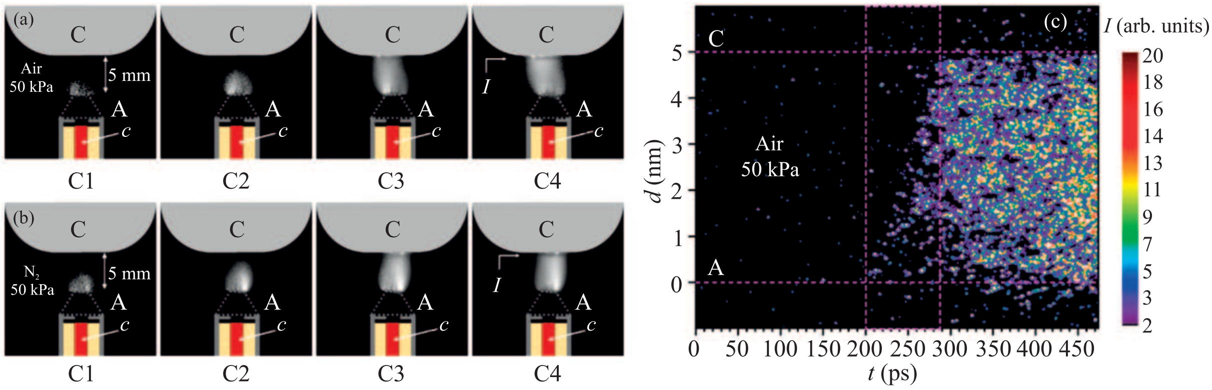

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a), (b) – Изображения свечения плазмы разряда в воздухе и азоте при давлении 50 кПа, снятые четырехканальной ICCD камерой. (c) – Временна́я развертка свечения плазмы разряда в воздухе при давлении 50 кПа, полученная с помощью стрик-камеры. C, A – катод и анод соответственно; *c* – приемная часть коллектора. *1* – темное пространство

Временна́я развертка свечения плазмы разряда вдоль промежутка в первые сотни пикосекунд, полученная с помощью стрик-камеры, показана на рис. 2c. Она также подтверждает, что формирование плазмы разряда начинается вблизи анода. Видно, как фронт свечения движется от анода к катоду и замыкает промежуток за 80–90 пс. Средняя скорость положительной волны ионизации составляет ≈ 5.5 см/нс. В данных условиях были зарегистрированы импульсы тока УЭ.

На рисунке 3 представлены осциллограммы напряжения при разряде в воздухе и в режиме холостого хода, а также осциллограммы тока УЭ. Режим холостого хода достигался при откачке газоразрядной камеры форвакуумным насосом до остаточного давления ~ 1 Па. В этих условиях импульс напряжения, отраженный от промежутка, был эквивалентен падающему импульсу.

Давление газов варьировалось в диапазоне 20–100 кПа, однако импульсы тока УЭ достоверно регистрировались при давлении воздуха 60 кПа и ниже. При разряде в азоте УЭ наблюдались в том числе при давлении 100 кПа. Для демонстрации были выбраны импульсы с близким временем запаздывания пробоя. Разница не превышала 30 пс. Также стоит отметить, что длина измерительного тракта оставалась неизменной при изменении давления. Только при давлении 20 кПа потребовалось включение в измерительный тракт аттенюатора с известной задержкой.

Видно, что амплитуда импульсов тока УЭ, как и следовало ожидать, растет с уменьшением давления газа. В диапазоне давления воздуха 30–60 кПа длительность импульсов на полувысоте составляет 68 пс, что соответствует импульсной характеристи-

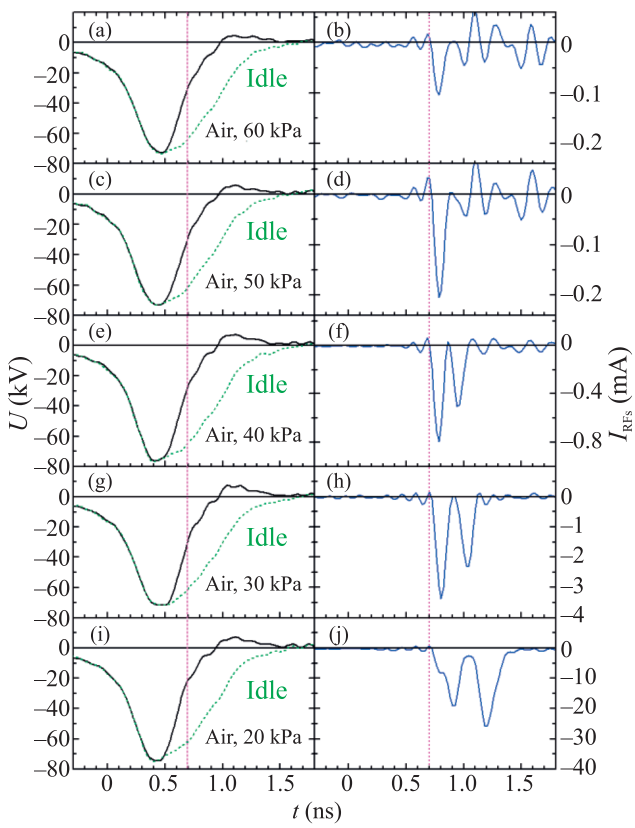

Рис. 3. (Цветной онлайн) Осциллограммы напряжения и тока УЭ при разряде в воздухе при различном давлении. Пунктирные вертикальные линии показывают момент регистрации тока УЭ коллектором, относительно напряжения на промежутке

ке осциллографа. Это означает, что реальная длительность импульсов тока УЭ может быть меньше этой величины. При давлении 30 кПа и ниже длительность импульсов превышала 68 пс. Любопытным является то, что при давлении воздуха 40 кПа и ниже наблюдается пара импульсов тока УЭ. При этом амплитуда второго импульса могла превышать амплитуду первого.

Привязка осциллограмм импульсов тока УЭ к напряжению осуществлялась способом, описанным ниже. Положение импульсов тока УЭ на временной школе относительно импульсов напряжения, отмеченное вертикальной пунктирной линией на рис. 3, соответствует приходу УЭ на коллектор.

Посредством измерения с помощью коллектора тока смещения, вызванного волной ионизации, вместе с током УЭ можно определить момент генерации УЭ относительно волны ионизации [31, 32]. Однако измерения тока смещения в данной конфигурации газоразрядного промежутка не проводились ранее, и для начала необходимо было определить амплитудно-временные параметры ДТС, вызванного волной ионизации, в чистом виде без влияния на сигнал тока смещения, вызванного нарастанием либо спадом напряжения, а также током УЭ, которые попадают на коллектор. Для этих целей идеально подходит импульс напряжения положительной полярности прямоугольной формы с длительным плато и достаточно быстрым нарастанием и спадом. Генератор ГИН-50-1 формирует именно такие импульсы напряжения.

На рисунке 4a–c представлены изображения свечения плазмы разряда в воздухе при давлении 100 кПа, снятые четырехканальной ICCD камерой при положительной полярности за один импульс, а также соответствующие осциллограммы напряжения и тока смещения.

Как и при отрицательной полярности, формирование плазмы начинается вблизи заземленного острийного электрода, который в данном случае является катодом. Видно (рис. 4a), как несколько отрицательных стримеров движутся в направлении высоковольтного электрода (анода). Однако только один из них образует в конечном итоге сильноточный канал (рис. 4a, C4). На рисунке 4b, c приведены осциллограммы напряжения и тока смещения, соответствующие данной реализации разряда, а также режиму холостого хода. Осциллограмма тока смещения (рис. 4c) была привязана к импульсу напряжения по емкостному току $I_C = CdU/dt$, где C – емкость промежутка, U – напряжение. Видно, что при появлении плазмы вблизи острийного заземленного электрода (катода) возникает ток смещения вследствие быстрого перераспределения электрического поля. Это ДТС. Полярность сигнала ДТС указывает на то, что напряженность электрического поля вблизи заземленного острийного электрода резко падает при появлении плазмы в его окрестности. При достижении ДТС нулевой отметки напряженность электрического поля близи острийного электрода достигает локального минимума. Однако затем обратная волна ионизации прибывает в эту область и напряженность электрического поля начинает расти (положительная полярность ДТС). Видно, что после этого напряжение на промежутке уменьшается – произошел пробой. Средняя скорость стримера, оцененная по длительности сигнала ДТС отрицательной полярности, составила ≈ 0.5 см/нс.

В азоте при давлении 100 кПа (рис. 4d–h) были получены аналогичные осциллограммы напряжения и тока смещения, но при отрицательной полярности "плоского" электрода. При этом удалось измерить одновременно ток смещения и ток УЭ (рис. 4f). Условия, при которых ток УЭ и ток смещения были одного порядка величины, были достигнуты при использовании сетки с размером ячеек 1 мм, изготовленной из проволочек диаметром 100 мкм. Для начала рассмотрим рис. 4d, e, на которых представлены осциллограммы напряжения и тока смещения при разряде (сплошные линии) и в режиме холостого хода (пунктирные линии). Осциллограммы тока смещения привязаны к осциллограммам напряжения по емкостному току $I_C = CdU/dt$. Как и в случае положительной полярности (рис. 4a–c), появление и распространение катодонаправленной волны ионизации сопровождается ДТС. Сигнал ДТС (рис. 4e) точно показывает, в какой момент времени появился стример и когда он пересек промежуток. Согласно длительности ДТС средняя скорость стримера составила ≈ 4 см/нс.

Рисунок 4f показывает результат измерений тока смещения и тока УЭ вместе, а на рис. 4g показана разница сигналов, представленных на рис. 4f и рис. 4e. Для сравнения на рис. 4h показана осциллограмма тока УЭ, измеренного без ДТС. Видно, что пучок УЭ (рис. 4g) попадает на коллектор на ≈ 250 пс позже, чем появляется сигнал ДТС, вызванный появлением стримера. Если предположить, что пучок электронов был сгенерирован вблизи заземленного острийного электрода (анода), кромка которого находится на расстоянии 4 мм от коллектора, при старте положительной волны ионизации, то их энергия должна составлять $\sim 0.7 \cdot 10^3$ эВ ($v \sim 1.6 \cdot 10^9$ см/с). Это выглядит крайне маловероятно. Другой вариант – генерация УЭ в катодном слое после замыкания промежутка плазмой. Такой механизм генерации УЭ реализуется после пробоя промежутка остриеплоскость при напряжениях несколько десятков ки-

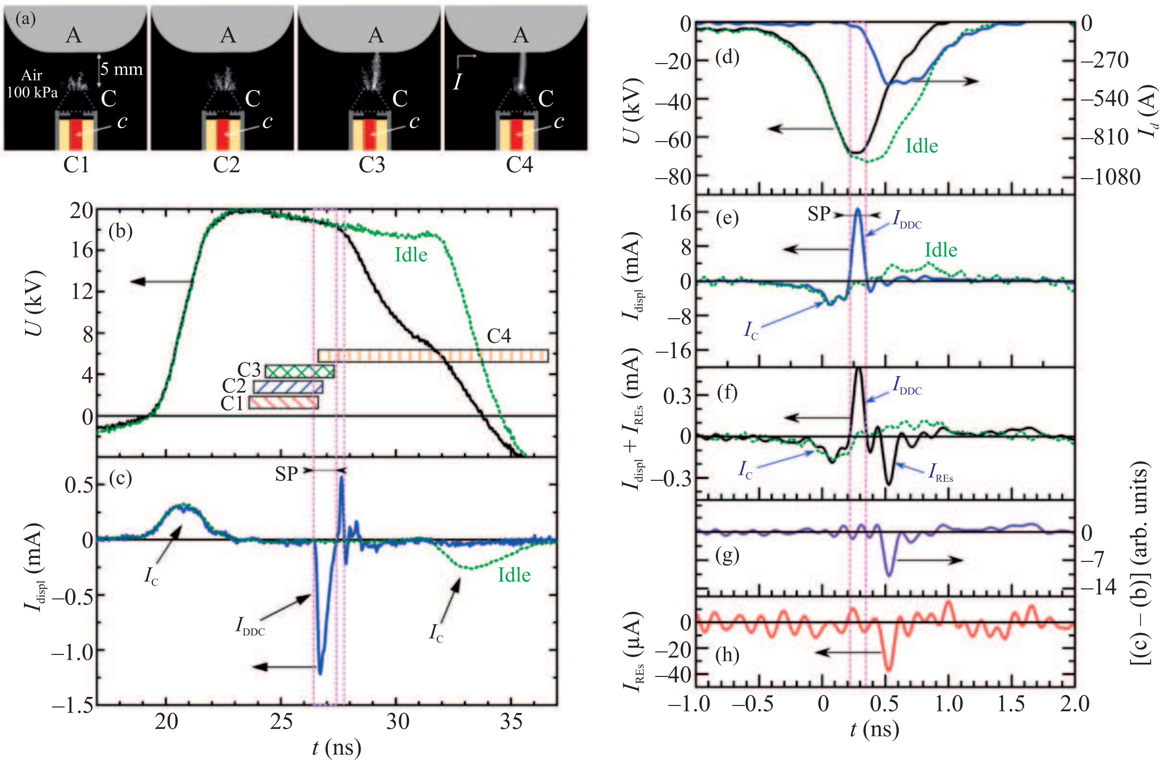

Рис. 4. (Цветной онлайн) (a) – Изображения свечения плазмы разряда в воздухе при давлении 100 кПа, снятые четырехканальной ICCD камерой при положительной полярности. A, C – анод и катод соответственно; *c* – приемная часть коллектора. C1–C4 – номера каналов ICCD камеры. (b), (c) – Соответствующие осциллограммы напряжения и тока смещения при разряде (сплошные линии) и в режиме холостого хода (пунктирные линии). Прямоугольниками C1–C4 показаны моменты включения каналов камеры. Длина прямоугольников соответствует длительности экспозиции. (d), (e) – Осциллограммы напряжения, тока разряда и тока смещения при разряде (сплошные линии) и в режиме холостого хода (пунктирные линии). (f) – Осциллограммы тока смещения в режиме холостого хода (пунктирная линия), а также суммы тока УЭ и тока смещения (сплошная линия). (g) – Разница сигналов рис. 4f и рис. 4e. (h) – Осциллограмма тока УЭ, измеренного в эксперименте. SP – стадия распространения стримера. Азот при давлении 100 кПа

ловольт [31, 32], о чем упоминалось во введении. В этом случае при оценках энергии электронов необходимо учитывать расстояние от катода до коллектора (9 мм), а запаздывание импульса тока УЭ отсчитывать от момента прибытия стримера на катод (≈ 110 пс). В этом случае энергия электронов составляет $\sim 2\cdot10^4$ эВ ($v \sim 8.3\cdot10^9$ см/с). Эти оценки коррелируют с результатами измерения энергии электронов методом фольг. Перед диафрагмой коллектора устанавливались либо алюминиевая фольга толщиной 10 мкм, либо диэлектрическая пленка кимфоль толщиной 2 мкм с алюминиевым покрытием толщиной 0.2 мкм. Они прозрачны для электронов с энергиями ≈ 32 и ≈ 10 кэВ соответственно. Так, в исследуемом диапазоне давлений газов пучок УЭ наблюдался только при использовании кимфоли. При этом наблюдались только одиночные импульсы тока УЭ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что генерация УЭ происходит в области катодного падения потенциала, характеризующейся высокой напряженностью электрического поля, которая может превышать значение критической напряженности, требуемое для перехода электронов в режим убегания, а также обеспечивать поток электронов с катода благодаря автоэлектронной, фотоэлектронной эмиссии и при бомбардировке поверхности катода ионами. В пользу этой гипотезы свидетельствует также уменьшение амплитуды импульсов тока УЭ в 2 и более раз в случае, когда плоский катод был накрыт тефлоновой пленкой толщиной 100 мкм. Если бы УЭ генерировались вблизи заземленного острийного электрода (анода) или на фронте положительной волны ионизации, то тефлоновая пленка не оказывала бы никакого влияния на параметры тока УЭ.

Выводы. Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что при пробое промежутков "плоскость–острие" вследствие развития положительной волны ионизации генерируются убегающие электроны. Однако механизм их генерации принципиально отличается от случая, когда пробой происходит вследствие развития отрицательной волны ионизации. Убегающие электроны генерируются не при старте волны ионизации или на ее фронте, а уже после того, как плазма замкнула промежуток. Вероятно, после прибытия положительной волны ионизации на плоский катод объемный положительный заряд на ее фронте приводит к формированию катодного слоя с высокой напряженностью электрического поля, который обеспечивает эмиссию электронов с катода. При этом часть эмитированных электронов способна переходить в режим убегания. Полученный результат расширяет представление о генерации убегающих электронов в наносекундных разрядах в резко неоднородном электрическом поле. Вкупе с результатами предшествующих исследований можно сделать вывод, что формирование катодного слоя и генерация убегающих электронов в нем является ординарным явлением наносекундных газовых разрядов. Это эффект может быть как полезным, так и отрицательным вследствие возникновения сопутствующего рентгеновского излучения. Особенно это касается устройств на основе разряда в гелии, для которого значение критической напряженности электрического поля в ≈ 4 раза меньше, чем для азота [2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта # 20-02-00733, а также в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект # FWRM-2021-0014.

1. L. P. Babich, *High-energy phenomena in electric discharges in dense gases: theory, experiment, and natural phenomena*, Futurepast, Arlington (2003).
2. Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц, *Физика импульсного пробоя газов*, Наука, М. (1991).
3. *Runaway electrons preionized diffuse discharges*, ed. by V. F. Tarasenko, Nova Science Publishers, Inc., N.Y. (2014).
4. Y. Li, Y. Fu, Z. Liu, H. Li, P. Wang, H. Luo, X. Zou, and X. Wang, Plasma Sources Sci. Technol. **31**, 045027 (2022).
5. G. A. Mesyats, E. A. Osipenko, K. A. Sharypov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. I. Yalandin, and N. M. Zubarev, IEEE Electron Device Lett. **43**, 627 (2022).
6. E. I. Bochkov, L. P. Babich, and I. M. Kutsyk, Plasma Phys. Rep. **47**, 1027 (2021).
7. D. Levko, J. Appl. Phys. **126**, 083303 (2019).
8. V. V. Lisenkov, Y. I. Mamontov, and I. N. Tikhonov, J. Phys. Conf. Ser. **2064**, 012021 (2021).
9. E. Oreshkin, EPL **136**, 15001 (2021).
10. A. Kozyrev, V. Kozhevnikov, and N. Semeniuk, Plasma Sources Sci. Technol. **29**, 125023 (2020).
11. А. В. Козырев, Е. М. Баранова, В. Ю. Кожевников, Н. С. Семенюк, Письма в ЖТФ **43**, 56 (2017).
12. V. Y. Kozhevnikov, A. V. Kozyrev, N. S. Semeniuk, and A. O. Kokovin, Russ. Phys. J. **61**, 603 (2018).
13. Y. Rybin, N. Kalinin, and M. Timshina, IEEE Trans. Plasma Sci. **49**, 1262 (2021).
14. A. Y. Starikovskiy, N. L. Aleksandrov, and M. N. Shneider, J. Appl. Phys. **129**, 063301 (2021).
15. K.-D. Weltmann, J. F. Kolb, M. Holub, D. Uhrlandt, M. Šimek, K. Ostrikov, S. Hamaguchi, U. Cvelbar, M. Černak, B. Locke, A. Fridman, P. Favia, and K. Becker, Plasma Process Polym. **16**, 1800118 (2018).
16. V. F. Tarasenko, D. V. Beloplotov, M. I. Lomaev, and D. A. Sorokin, J. Chem. Chem. Eng. **8**, 1156 (2014).
17. В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, А. Г. Бураченко, М. И. Ломаев, Прикладная физика **2016**, 49 (2016).
18. J. R. Dwyer, Z. Saleh, H. K. Rassoul, D. Concha, M. Rahman, V. Cooray, J. Jerauld, M. A. Uman, and V. A. Rakov, J. Geophys. Res. Atmos. **113**, D23207 (2008).
19. C. V. Nguyen, A. P. J. van Deursen, E. J. M. van Heesch, G. J. J. Winands, and A. J. M. Pemen, J. Phys. D: Appl. Phys. **43**, 025202 (2010).
20. A. V. Kozyrev, V. Y. Kozhevnikov, I. D. Kostyrya, D. V. Rybka, V. F. Tarasenko, and D. V. Schitz, Atmos. Ocean. Opt. **25**, 176 (2012).
21. M. B. Zheleznyak, A. K. Mnatsakanyan, and S. V. Sizykh, High Temp. **20**, 357 (1982).
22. A. A. Kulikovsky, J. Phys. D: Appl. Phys. **33**, 1514 (2000).
23. S. Pancheshnyi, Plasma Sources Sci. Technol. **24**, 015023 (2015).
24. N. Y. Babaeva, D. V. Tereshonok, and G. V. Naidis, Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 044008 (2016).
25. J. Teunissen and U. Ebert, Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 044005 (2016).
26. A. Bourdon, F. Péchereau, F. Tholin, and Z. Bonaventura, Plasma Sources Sci. Technol. **30**, 105022 (2021).
27. A. Brisset, K. Gazeli, L. Magne, S. Pasquiers, P. Jeanney, E. Marode, and P. Tardiveau, Plasma Sources Sci. Technol. **28**, 055016 (2019).
28. N. Y. Babaeva, G. V. Naidis, D. V. Tereshonok, and E. E. Son, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 434002 (2018).
29. Д. В. Белоплотов, М. И. Ломаев, В. Ф. Тарасенко, Д. А. Сорокин, Письма в ЖЭТФ **107**, 636 (2018).

30. D. V. Beloplotov, M. I. Lomaev, D. A. Sorokin, and V. F. Tarasenko, Phys. Plasmas **25**, 083511 (2018).
31. Д. В. Белоплотов, В. Ф. Тарасенко, В. А. Шкляев, Д. А. Сорокин, Письма в ЖЭТФ **113**, 133 (2021).
32. D. V. Beloplotov, V. F. Tarasenko, V. A. Shklyaev, and D. A. Sorokin, J. Phys. D: Appl. Phys. **54**, 304001 (2021).
33. 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*, ed. by F. Sabath, D. V. Giri, F. Rachidi-Haeri, A. Kaelin, Springer, N.Y. (2010), Part 5, p. 301.