

Длительность пучка убегающих электронов при субнаносекундном фронте импульса напряжения

© В.Ф. Тарасенко,^{1,2} Д.В. Белоплотов,¹ Д.А. Сорокин¹

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 16 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 3 февраля 2022 г.

Принято к публикации 4 февраля 2022 г.

Исследованы условия, в которых при субнаносекундном пробое сантиметровых промежутков, заполненных воздухом атмосферного давления, регистрируются импульсы тока пучка убегающих электронов (ПУЭ) минимальной длительности. Показано, что длительность импульса тока ПУЭ зависит от многих параметров, в том числе от формы катода, величины межэлектродного зазора, диаметра диафрагмы, являющейся частью анода, а также от размера приемной части коллектора. Установлено, что применение катодов с протяженной кромкой, имеющей малый радиус кривизны, при малых диаметрах отверстия в аноде могут регистрироваться ПУЭ, состоящих из двух пиков пикосекундной длительности.

Ключевые слова: убегающие электроны, ток пучка, пикосекундная длительность импульса.

Введение

В настоящее время изучению формирования убегающих электронов (УЭ) в различных условиях уделяется очень большое внимание. Только за последние годы опубликованы сотни работ. Наибольшее число статей в последние два года были посвящены изучению влияния УЭ на нагрев плазмы в установках для получения управляемого термоядерного синтеза, см., например, [1–3]. В установках типа ТОКАМАК подробно изучаются разряды, генерирующие УЭ, которые приводят к повреждению стенок вакуумной камеры. Широко исследуются различные атмосферные разряды [4–6], в том числе их моделирование в метровых разрядных промежутках [7]. Установлено, что высоковольтный пробой сопровождается генерацией высокоэнергетических частиц [4–7].

Большое внимание уделяется изучению параметров пучков УЭ в лабораторных разрядах при повышенных давлениях воздуха и других газов, а также рентгеновского излучения под воздействием пучка убегающих электронов (ПУЭ) [8–19]. Значительная часть этих исследований проводится в условиях пробоя сантиметровых промежутков с катодами малого радиуса кривизны, заполненных воздухом при атмосферном давлении. Изучаются как параметры тока ПУЭ в различных условиях, так и механизм генерации УЭ. Исследования также проводятся посредством моделирования разрядов с УЭ, см., например, [9–11, 15, 20–22].

Начиная с первых работ по экспериментальному изучению генерации УЭ в воздухе атмосферного давления, длительность импульса ПУЭ за анодом из фольги является одним из сложно измеримых параметров, поскольку

требует применения широкополосных измерительных приборов, и привлекает внимание исследователей. Данный вопрос остается актуальным и в настоящее время благодаря развитию измерительной техники. Необходимо установить влияние на длительность импульса ПУЭ различных параметров (давления и сорта газа, амплитуды и длительности фронта импульса напряжения, длины разрядного промежутка, конструкции катода и анода). Причем такие исследования следует проводить при пикосекундном временном разрешении измерительной аппаратуры и используемых датчиков. Также в литературе очень мало данных о форме импульса ПУЭ в условиях генерации коротких импульсов.

Впервые прямые измерения длительности и формы импульса ПУЭ при разряде в воздухе атмосферного давления были выполнены в работе [23] с использованием цилиндра Фарадея. Длительность зарегистрированных импульсов не превышала 1.5 ns на полувысоте. По мнению авторов работы, см. [23], она была завышена из-за недостаточного разрешения имеющейся аппаратуры. Измерения длительности импульсов рентгеновского излучения под действием ПУЭ, выполненные с помощью рентгеновского электронного умножителя 14ЭЛУ10 с разрешением по фронту ~ 1.2 ns, дали аналогичный результат. Отметим, что измеренный в [23] импульс тока пучка имел треугольную форму. Исследования, посвященные изучению генерации ПУЭ в различных условиях, проведенные в этой научной группе, а также в других научных группах, были суммированы в 2003 г. В монографии [24] отмечалось, что измеренная длительность ПУЭ в воздухе атмосферного давления не превышает на полувысоте 0.5 ns. С другой стороны, на основе оценок

предполагалось, что длительность импульса тока пучка убегающих электронов с „аномальной“ энергией может составлять не более 50 ps. К электронам с аномальной энергией относятся электроны с энергией $T_a > eU$, где e — заряд электрона, U — напряжение на промежутке. Отметим, что в [25] на основе ошибочных результатов при измерении спектра электронов предполагалось, что в воздухе атмосферного давления ПУЭ за анодной фольгой близок к моноэнергетическому и состоит из электронов с энергией, превышающей eU на ≈ 100 keV, при $U = 150\text{--}210$ kV. Наличие широкого спектра ПУЭ в различных условиях, а также малого числа электронов с аномальной энергией было показано в [26,27], где число электронов с аномальной энергией не превышало 10%, а также в [28] (см. там рис. 4).

При использовании вакуумных диодов, а также применения импульсов напряжения субнаносекундной длительности, примерно в это время, были зарегистрированы импульсы тока пучка с длительностью на полувысоте 0.12–0.15 ns [29]. Этому способствовали сравнительно большие амплитуды тока пучка, которые достигали 320 A при использовании катода в виде одиночного острия. Амплитуды токов пучка в [29] были на несколько порядков больше по сравнению с амплитудами ПУЭ, полученными в [23–25] с газовым диодом, заполненным воздухом атмосферного давления. Для регистрации импульсов тока пучка в [29] применялись коллектор, имеющий форму диска, и осциллограф ИЭ-7. Для увеличения разрешающей способности в осциллографе была применена трубка имеющая малую чувствительность (3.5 kV/cm) с коаксиальной отклоняющей системой.

Определить реальную длительность импульса ПУЭ в [23,25] и в работах, цитируемых в [24], не позволило отсутствие аппаратуры с высокими чувствительностью и разрешающей способностью, а также малые амплитуды ПУЭ в неоптимальных условиях. В воздухе атмосферного давления за анодной фольгой толщиной $8\text{ }\mu\text{m}$ в [23] было получено всего $8 \cdot 10^8$ электронов.

Применение осциллографа TDS-684B (1 GHz, 5 GS/s) при дальнейших исследованиях генерации ПУЭ в воздухе атмосферного давления дало возможность в [30] зарегистрировать с помощью коллектора импульсы ПУЭ длительностью на полувысоте 0.3 ns. В этой работе использовались коаксиальные кабели и ослабители 142-NM фирмы Barth Electronics с частотой пропускания 30 GHz. В работе [30] амплитуда ПУЭ была существенно увеличена, а также было показано, что с уменьшением размера приемной части коллектора длительность импульса ПУЭ на полувысоте уменьшается.

Более короткие ПУЭ были зарегистрированы при использовании осциллографов с большим временным разрешением. Так, в [31] был применен осциллограф TDS-7405 (4 GHz, 20 GS/s). С дисковым коллектором диаметром 2 см длительность ПУЭ сократилась до 0.2 ns. Также в [31] было подтверждено, что при уменьшении размеров приемной части коллектора регистрируются импульсы ПУЭ меньшей длительности. Последующий

анализ результатов, полученных в [31], показал, что длительность импульса ПУЭ была завышена из-за недостаточного временного разрешения используемого коллектора [8].

Впервые о регистрации импульсов ПУЭ длительностью на полувысоте ≈ 100 ps было сообщено в работе [32]. Полученная длительность соответствовала предельному временному разрешению осциллографа TDS-6604 (6 GHz, 20 GS/s). При этом размер приемной части коллектора равнялся 4 mm и его временное разрешение было не хуже 50 ps. Однако, как показали последующие исследования, см., например, обзор [8], эта длительность соответствовала средним значениям длительности импульсов ПУЭ за всей поверхностью анодной фольги, регистрируемых в воздухе атмосферного давления и сантиметровых промежутках при наносекундных импульсах напряжения с амплитудой ~ 100 kV.

В [33] при использовании осциллографа TDS6514C (15 GHz, 40 GS/s) были зарегистрированы импульсы ПУЭ длительностью на полувысоте 45 ps. Временное разрешение осциллографа было ≈ 30 ps. Это позволяло регистрировать и более короткие импульсы ПУЭ. Считаем, что длительность импульса тока пучка определялась в условиях [33] диаметром приемной части коллектора, который равнялся 10 mm.

Еще более короткие импульсы ПУЭ были зарегистрированы в [34], см также обзор [35]. Это было достигнуто не только за счет применения широкополосных осциллографов LeCroy WaveMaster 830Zi-A (30 GHz, 80 GS/s) и Tektronix DSA72504D (25 GHz, 100 GS/s) и коллектора с малым (3 mm) диаметром приемной части, но и за счет установки на аноде диафрагмы с отверстием малого диаметра. В результате при диаметре отверстия в диафрагме 0.5 и 1 mm были зарегистрированы в воздухе при атмосферном давлении импульсы ПУЭ длительностью на полувысоте 20–25 ps. Эта длительность соответствовала предельной разрешающей способности используемых осциллографов. Кроме того, в экспериментах [34,35] было показано, что при увеличении диаметра отверстия в диафрагме на аноде и приемной части коллектора длительность импульса ПУЭ увеличивается и достигает ≈ 100 ps. Из этого следовало, что при регистрации только части электронов пучка длительность соответствующих импульсов существенно меньше, чем при регистрации электронов за всей поверхностью анодной фольги. Также в [34] было установлено, что длительность ПУЭ, регистрируемых через анодную диафрагму диаметром 1 mm из приосевой части промежутка, зависит от величины межэлектродного расстояния и конструкции катода.

Эксперименты, в которых зарегистрированы ПУЭ наименьшей длительности, описаны в работе [28]. Для измерения параметров ПУЭ и импульса напряжения на промежутке использовались осциллографы Keysight DSAZ594A (59 GHz, 160 GS/s) и Tektronix DPO73304D (33 GHz, 100 GS/s). При амплитуде и длительности фронта импульса напряжении холостого хода соответственно

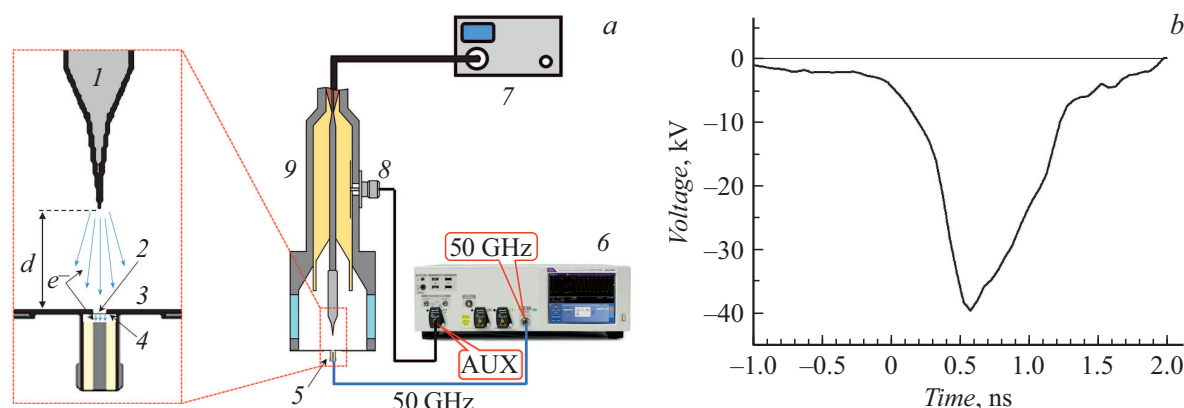


Рис. 1. *a* — установка для исследования параметров пучка УЭ с генератором GIN-55-1: 1 — катод, 2 — Al-фольга, 3 — анод с отверстием, 4 — диафрагма, 5 — коллектор, 6 — осциллограф, 7 — высоковольтный генератор, 8 — емкостной делитель, 9 — передающая линия 75 Ω ; *b* — импульс напряжения на согласованной нагрузке, амплитуда которого удваивалась при холостом ходе.

180 kV и 250 ps, а также при использовании катода в виде конуса был зарегистрирован импульс тока ПУЭ длительностью на полувысоте ≈ 9 ps. Это значение соответствовало временному разрешению осциллографа и коллектора. При этом, как и в [34,35], измерялась только часть тока ПУЭ на оси газового диода посредством использования диафрагмы на аноде диаметром 1 mm. Измерения при других диаметрах диафрагмы не проводились. Соответственно в [28] регистрировались убегающие электроны, прошедшие только через диафрагму диаметром 1 mm.

Проведенный нами анализ известных работ показывает, что вопрос о длительности импульса ПУЭ и о влиянии на него различных факторов остается открытым.

Цель настоящей работы — исследовать влияние ряда важных параметров (диаметра анодной диафрагмы, конструкции катода, толщины анодной фольги, величины межэлектродного зазора) на длительность и форму импульса ПУЭ. Для ее выполнения были выбраны генераторы импульсов напряжения с субнаносекундной длительностью фронта, что позволяет получать сравнительно большие амплитуды тока пучка убегающих электронов.

1. Экспериментальная установка и методики

Исследования проводились на двух установках с генераторами, формирующими импульсы напряжения отрицательной полярности с длительностью фронта короче 1 ns. В экспериментах применялись осциллографы с высоким временным разрешением и коллекторы с малым диаметром приемной части, которые устанавливались за плоским анодом с различными диафрагмами. Установка с генератором GIN-55-1 [36] показана на рис. 1.

Ранее, см. [13,14,17,19], подобная установка использовалась для изучения формирования разряда, а также в исследованиях пучка убегающих электронов и динамического тока смещения. Генератор формировал импульсы напряжения с амплитудой в падающей волне $U \approx 38$ kV и фронтом $\tau_{0.1-0.9} \approx 0.7$ ns при длительности на полувысоте $\tau_{0.5} \approx 1$ ns (рис. 1, *b*), которые по кабелю и передающей линии 9 с волновыми сопротивлениями 75- Ω подавались на разрядный промежуток с зазором $d = 6$ mm. Использовались два разных катода с малым радиусом кривизны. Первый имел форму конуса с углом при вершине 90° , как и в работе [28]. Второй катод был изготовлен из 5 mm обрезка швейной иглы (нержавеющая сталь) с диаметром основания 1 mm и радиусом кривизны острия $75 \mu\text{m}$ (рис. 1, *a*). Плоский анод был изготовлен из медной фольги толщиной 0.1 mm с отверстием в центре 1 mm. Он располагался на медном диске толщиной 1 mm с отверстием в центре (соосное с отверстием в аноде) диаметром 1 mm. В ряде экспериментов использовался анод из медной фольги с диаметром отверстия 0.1 mm.

Разрядная камера была также оснащена емкостным делителем напряжения и коллектором. Для регистрации ПУЭ использовался коллектор с диаметром приемной части ≈ 1 mm, изготовленного из фланцевого разъема SMA 2.92 mm (рис. 1, *a*). Алюминиевые фольги толщиной 10 и 50 μm могли быть помещены между анодом и диафрагмой. С их помощью можно было отсечь низкоэнергетичные электроны в ПУЭ. Для передачи сигнала от коллектора до АП-канала осциллографа Tektronix DPO75002SX (50 GHz, 200 GS/s) применялась кабельная сборка SUCOFLEX 101PEA (HUBER SUHNER) длиной 1 m, рассчитанная на передачу сигналов с малыми потерями до частоты 50 GHz. Какие-либо ослабители сигналов при измерении коротких импульсов ПУЭ не использовались.

Установка с генератором СЛЭП-150М [8,35], газовым диодом и коллектором показана на рис. 2, *a*.

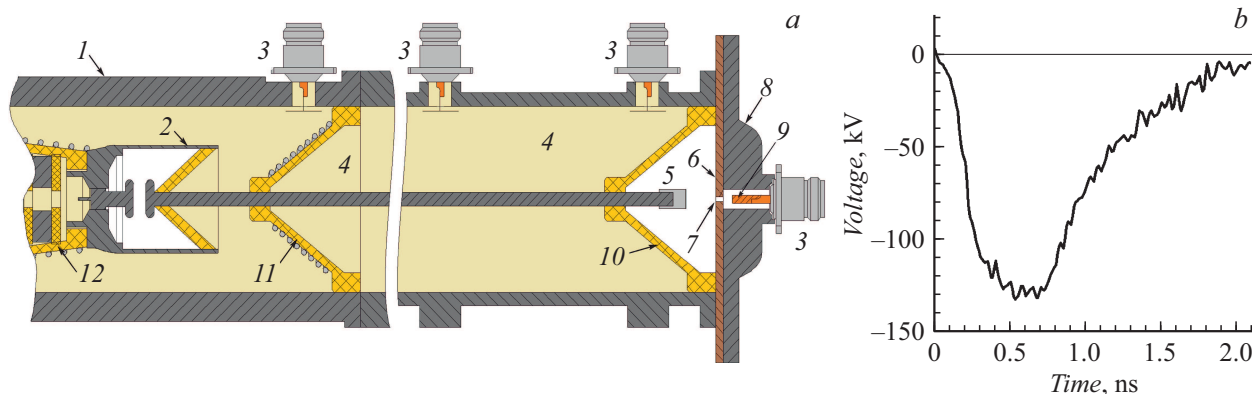


Рис. 2. *a* — установка с генератором СЛЭП-150М: 1 — корпус генератора, 2 — разрядник высокого давления Р-43, 3 — разъемы для подключения широкополосных кабелей, 4 — коаксиальные линии с волновым сопротивлением $100\ \Omega$, 5 — трубчатый катод, 6 — анод из Al-фольги, 7 — отверстие в диафрагме, 8 — корпус коллектора, 9 — приемная часть коллектора диаметром 3 мм, 10 — изолятор, 11 — изолятор с индуктивностью для заземления центрального проводника коаксиальной линии, 12 — импульсный трансформатор; *b* — импульс напряжения на согласованной нагрузке, амплитуда которого удваивалась при холостом ходе.

Генератор СЛЭП был разработан для получения пучков электронов в газовых диодах с наибольшими амплитудами [8], а коаксиальные линии 4 использовались для измерения падающей и отраженной волн и восстановления напряжения на промежутке [35]. Конструкции коаксиальной линии, заполненной трансформаторным маслом, и газового диода были подобны, используемым в работах [8,34,35]. Внутренний проводник диаметром 4 см высоковольтной коаксиальной линии с волновым сопротивлением $30\ \Omega$ был образован корпусом обостренного разрядника Р-43. Напряжение пробоя разрядника зависело от конкретного образца и срока его эксплуатации. В данных экспериментах генератор обычно формировал импульсы напряжения с амплитудой в падающей волне $U \approx 130\ \text{kV}$ и фронтом $\tau_{0.1-0.9} \approx 0.3\ \text{ns}$ при длительности на полувывоте $\tau_{0.5} \approx 1\ \text{ns}$ (рис. 2, *b*). Катодом служила трубка диаметром $\approx 6\ \text{mm}$ из стальной фольги толщиной $100\ \mu\text{m}$ или шар диаметром $\approx 9.5\ \text{mm}$. Вывод электронного пучка осуществлялся через анод, который был выполнен из Al-фольги толщиной $10\ \mu\text{m}$. Расстояние между анодом и катодом d изменялось от 6 до 16 мм. Для измерения пучков электронов из приосевой зоны газового диода за Al-фольгой устанавливалась диафрагма диаметром 1 мм и толщиной 5 мм.

Импульсы тока ПУЭ записывались осциллографами LeCroy WaveMaster 830Zi-A (30 GHz, 80 GS/s) или Tektronix DSA72504D (25 GHz, 100 GS/s). Применялись высокочастотный кабель RG58-A/U (Radiolab) длиной 1 м и разъемы SMA. Измерения проводились при частоте следования импульсов не более 1 Hz.

2. Параметры, влияющие на длительность импульса ПУЭ

Как было уже отмечено, цель работы — изучить влияние различных параметров на длительность импульса тока ПУЭ за плоским анодом с диафрагмой при

использовании осциллографов и коллекторов с высоким временным разрешением. Ранее в [34,35] было показано, что с увеличением диаметра диафрагмы и увеличением размеров приемной части коллектора увеличивается длительность регистрируемых импульсов тока ПУЭ. Предварительные исследования подтвердили эти результаты. Потому в настоящих экспериментах отверстия в аноде составляли 1 и 0.1 мм при диаметре приемной части коллектора 1 мм. Соответственно было изучено влияние различных факторов на параметры центральной части электронов пучка, который формировался на оси газового диода.

Минимальные длительности импульсов тока ПУЭ в настоящей работе были зарегистрированы с помощью осциллографа Tektronix DPO75002SX. Предварительно было проведено сравнение длительностей импульсов тока ПУЭ на полувывоте с двумя различными диаметрами отверстий в аноде 1 и 0.1 мм. В экспериментах, проведенных ранее [35], было показано, что при диаметре отверстия более 1 мм длительность импульса увеличивается и составляет в воздухе атмосферного давления за всей поверхностью фольги $\sim 100\ \text{ps}$. Однако при диаметрах отверстия в аноде, меньших 0.5 мм, опыты не проводились. На рис. 3 приведены длительности импульсов тока ПУЭ на полувывоте, полученные при различных диаметрах отверстий в аноде, а также характерные осциллограммы.

При уменьшении диаметра отверстия в аноде разброс длительности импульсов ПУЭ увеличился, а амплитуда тока уменьшилась. На рис. 3, *a* показаны результаты двух серий измерений, в которых измерения длительности $\tau_{0.5}$ на полувывоте регистрировались при диаметре отверстия в аноде 0.1 и 1 мм. На рис. 3, *b* приведены примеры осциллограмм тока пучка ПУЭ с минимальными и максимальными длительностями при диаметре отверстия в аноде 0.1 мм. Эти осциллограммы демонстрируют изменение ПУЭ от реализации к реализации

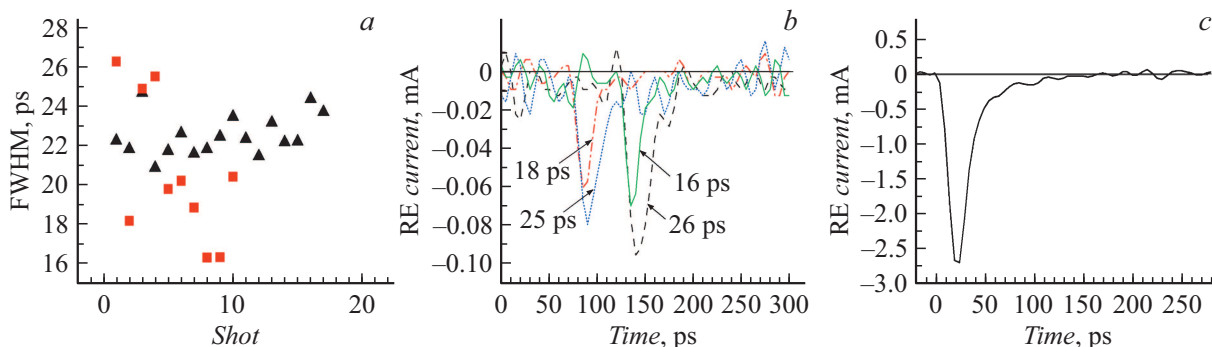


Рис. 3. *a* — длительности импульсов тока ПУЭ на полувысоте в различных импульсах при диаметре отверстия в аноде 1 (треугольники) и 0.1 mm (квадраты); *b* — осциллограммы двух пар импульсов тока ПУЭ при диаметре отверстия в аноде 0.1 mm, демонстрирующие изменение ПУЭ от реализации к реализации; *c* — типичная осциллограмма импульса тока ПУЭ при диаметре отверстия в аноде 1 mm. Генератор ГИН-55-1. Давление воздуха $p \approx 100$ kPa. Катод — игла.

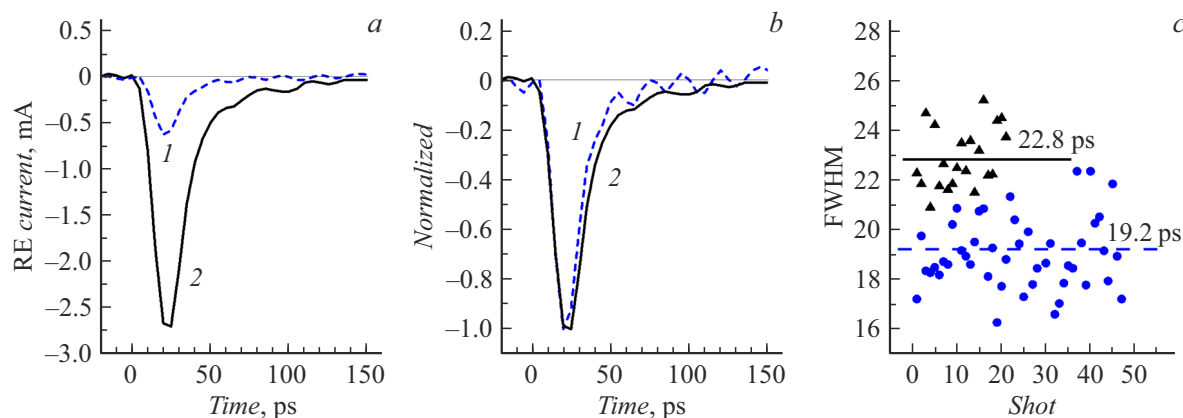


Рис. 4. *a, b* — осциллограммы импульсов тока ПУЭ средней амплитуды через отверстие в аноде диаметром 1 mm с катодами в виде конуса 1 и из швейной иглы 2 в абсолютных и относительных единицах соответственно; *c* — длительности тока ПУЭ на полувысоте от импульса к импульсу (треугольники — катод в виде иглы, кружки — катод в виде конуса). Генератор ГИН-55-1; $p \approx 100$ kPa.

при том, что начало генерации в некоторых случаях совпадает. Амплитуда тока пучка при уменьшении диаметра отверстия в аноде уменьшалась из-за поглощения большей части пучка в аноде. Увеличение разброса амплитуды и длительности тока пучка связано, как мы предполагаем, с микронеоднородностями распределения плотности тока пучка по поверхности анода. При увеличении диаметра отверстия влияние микронеоднородностей уменьшается. В результате с отверстием большего диаметра стабильность длительности и амплитуды импульсов тока пучка улучшается.

Типичная осциллограмма тока ПУЭ при диаметре отверстия в аноде 1 mm показана на рис. 3, *c*. Разброс $\tau_{0.5}$ при диаметре отверстий 1 mm был заметно меньше, чем при 0.1 mm. Форма импульсов ПУЭ близка к неравнобедренному треугольнику (импульсы ПУЭ также будут показаны на рис. 4–6). В данных условиях форма импульса ПУЭ и $\tau_{0.5}$ определялись только электронами, генерируемыми на оси газового диода. Минимальная длительность ПУЭ в этих экспериментах

была зарегистрирована при диаметре отверстия 0.1 mm и составила ≈ 16 ps.

Результаты по влиянию конструкции катода на длительность импульса ПУЭ показаны на рис. 4.

Эксперименты проводились с отверстием в аноде 1 mm, поскольку в этих условиях амплитуда и длительность ПУЭ были более стабильными. На рис. 4, *c* приведены данные для катода в виде конуса (кружки), которые были получены во второй серии экспериментов и на рис. 3, *a* не использовались. Было установлено, что переход от катода из швейной иглы к катоду, имеющего форму конуса, длительность импульса тока ПУЭ уменьшилась. С конусным катодом при большем диаметре отверстия в аноде (1 mm) в отдельных импульсах была зарегистрирована $\tau_{0.5} \approx 16$ ps. Эта длительность в два раза больше, чем в [28], где также измерялся ток ПУЭ из приосевой зоны газового диода. Отметим, что амплитуда импульса напряжения в [28] была в два раза больше, а длительность его фронта была в три раза короче, чем у генератора ГИН-55-1. Это могло привести к уменьшению длительности ПУЭ на оси газового диода.

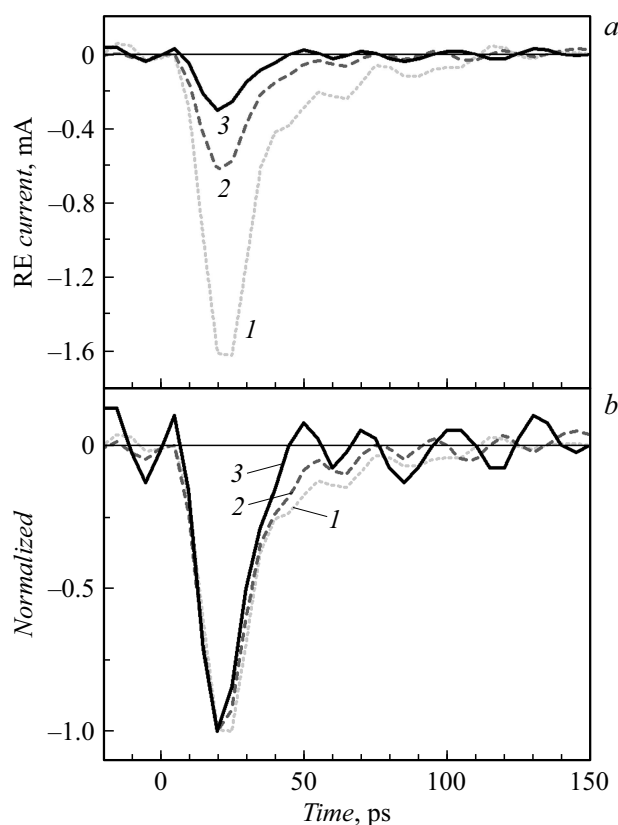


Рис. 5. Осциллограммы импульсов тока ПУЭ с конусным катодом в абсолютных (*a*) и относительных единицах (*b*): 1 — без Al-фольги, 2 — Al-фольга 10 μm , 3 — Al-фольга 50 μm . Генератор ГИН-55-1. $p \approx 100$ кПа.

С обоими катодами при атмосферном давлении воздуха на их остриях обычно формировалось по одному катодному пятну. Длительность импульса ПУЭ с катодом игла, по-видимому, увеличилась за счет эмиссии электронов и с боковой поверхности иглы, радиус кривизны которой существенно меньше, чем у боковой поверхности конусного электрода. Электрическое поле вблизи катода из иглы из-за ее меньшего радиуса кривизны и малого диаметра выше, чем вблизи вершины катода конуса.

При прохождении убегающих электронов через фольгу длительность импульса ПУЭ на полувысоте существенно не изменялась. Это следует из рис. 5, где пучок электронов также регистрировался через отверстие в аноде диаметром 1 мм.

В отсутствие Al-фольги средняя длительность импульса тока пучка на полувысоте за 50 включений ускорителя составила 23 ps. Как видно из рис. 5, с Al-фольгой толщиной 10 и 50 μm длительность импульса на полувысоте практически не изменилась. Для прохождения Al-фольги толщиной 10 μm энергия электронов должна превышать 32 keV, а для прохождения Al-фольги толщиной 50 μm — 83 keV. Отметим, что амплитуда импульса

напряжения при холостом ходе с генератором GIN-55-1 не превышала 76 kV.

Длительность импульса ПУЭ на уровне 0.2 при установке на аноде фольги толщиной 10 μm уменьшилась от 38 (без фольги) до 33 ps с фольгой 10 μm , а с фольгой 50 μm до 29 ps. Из этого можно предположить, что часть низкоэнергетических электронов в данных условиях генерируется у анода. При генерации электронов с начальной энергией 30 keV у катода, время на прохождение ими промежутка 6 мм составит ≈ 60 ps.

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов тока ПУЭ при разряде в воздухе в промежутках различной длины при подаче импульсов напряжения от генератора СЛЭП-150М.

Длительность импульса ПУЭ на полувысоте с трубчатым катодом увеличилась с 37 ps при зазоре 8 мм до 46 ps при зазоре 16 мм. Данная тенденция совпадает с полученной ранее в работе [34]. Объяснить увеличение длительности импульса можно расталкиванием электронов при их движении к аноду, а также разной начальной скоростью у катода. Известно, что убегающие электроны в пучке имеют разные энергии [8], в которых можно выделить 2–3 группы с разными энергиями.

Рис. 6, *b* демонстрирует влияние конструкции катода и напряжения генератора. Замена катода шара на трубчатый катод с протяженной кромкой с малым радиусом кривизны, на которой формировалось несколько ярких пятен, привело к увеличению длительности импульса ПУЭ с 26 до 34 ps. Это увеличение длительности тока пучка можно объяснить неодновременной эмиссией с различных частей трубчатого катода.

Длительность импульса 4 с катодом шаром несколько сократилась за счет увеличения напряжения в падающей волне генератора СЛЭП до 200 keV. Таким образом, увеличение амплитуды импульса напряжения при прочих равных условиях приводит к уменьшению длительности ПУЭ, генерируемого и измеряемого на оси газового диода.

Отметим важную особенность формы импульсов ПУЭ, записанных при использовании трубчатого катода, который имел протяженную кромку с малым радиусом кривизны. При регистрации десятков импульсов тока пучка были получены осциллограммы с двумя пиками, амплитуда которых изменялась. Кроме того, в данных экспериментах было зарегистрировано не только изменение амплитуды этих пиков, но и изменение задержки между их максимумами. На рис. 7 приведены осциллограммы, выбранные из серии в 50 реализаций разряда.

Осциллограмма 1 демонстрирует импульс ПУЭ, состоящий из двух пиков с примерно равной амплитудой. Длительность на полувысоте составила ≈ 84 ps. Импульс тока ПУЭ 2 также состоит из двух пиков. Его длительность совпадает с длительностью импульса тока ПУЭ 1, но амплитуда первого пика была больше, чем второго, а также увеличилось количество электронов в пучке. Задержка между максимумами пиков в 1 и 2 не изменилась. Однако импульс тока ПУЭ 3 имел другую

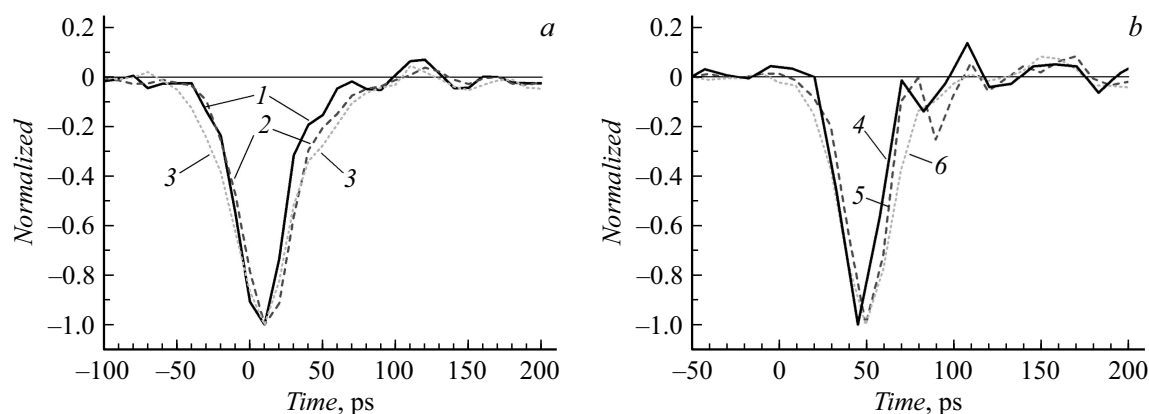


Рис. 6. *a* — осциллограммы импульсов тока ПУЭ с трубчатым катодом при различных межэлектродных расстояниях $d = 8$ (1), 12 (2) и 16 mm (3). Генератор СЛЭП-150М; *b* — осциллограммы импульсов тока ПУЭ с катодами шар (4, 5) и трубка (6) при напряжениях в падающей волне 200 (4) и 130 kV (6) и фронте 300 ps.

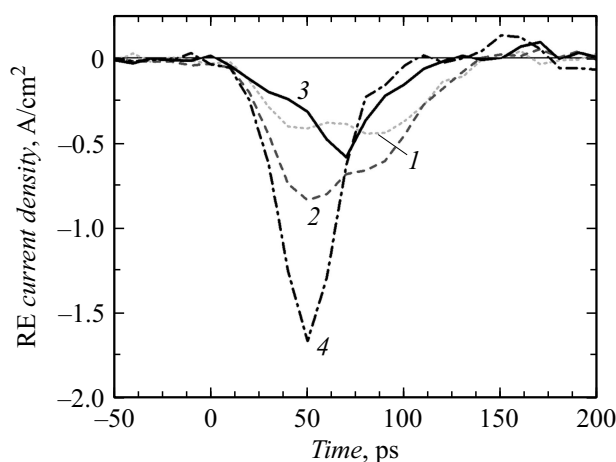


Рис. 7. Осциллограммы импульсов тока ПУЭ с трубчатым катодом при различных режимах эмиссии с трубчатого катода. Генератор СЛЭП-150М. $d = 8$ mm. Диафрагма 0.5 mm.

задержку между пиками. Такое изменение формы импульсов ПУЭ подтверждает неодновременную эмиссию электронов по длине острой кромки катода. Наибольшие амплитуды ПУЭ достигаются при одновременной эмиссии электронов с катода. При этом длительность импульса уменьшается, а амплитуда увеличивается. Осциллограмма 4 соответствует оптимальному режиму генерации убегающих электронов, при котором число электронов в пучке максимально. Амплитуды импульсов тока ПУЭ при таком режиме наибольшие, а длительность импульса на полувысоте наименьшая (37 ps с трубчатым катодом). Данная ситуация является наиболее благоприятной для реализации эффекта Аскарьяна [37], при котором часть убегающих электронов имеет „аномальную“ энергию [8,26,27]. Выше мы отмечали, что и в настоящих экспериментах пучок электронов регистрировался за Al-фольгой толщиной 50 μm при напряжении холостого хода генератора 76 kV.

3. Обсуждение результатов

Из результатов, полученных в наших предыдущих исследованиях [13,14,17,19,38] и в настоящей работе, следует, что в условиях генерации ПУЭ пробой промежутка с катодом игла происходит за счет широкого стримера шаровой формы. С катодами в форме конуса и шара при подборе их размеров, угла при вершине конуса и длины промежутка могут формироваться одиночные широкие стримеры, как и с катодом в виде иглы.

При катоде с длинной кромкой, имеющей малый радиус кривизны, например из тонкостенной трубки, формируются несколько стримеров цилиндрической или конической формы. Стримеры в этом случае движутся параллельно и перекрывают промежуток примерно в одно время. Средняя скорость стримера (волны ионизации) увеличивается с ростом напряжения на промежутке при постоянном давлении воздуха и других газов [21]. Скорость стримера достигает наибольших значений вблизи электродов [38]. Генерация убегающих электронов начинается у катода в самом начале процессов ионизации при максимальном напряжении на промежутке. Благодаря высокой напряженности электрического поля из лавин образуется стример за чрезвычайно короткое время (десятки пикосекунд). Его появление и распространение по промежутку можно отслеживать с высокой (десятки пикосекунд) точностью посредством измерения тока смещения, обусловленного перераспределением электрического поля при формировании стримера [14,38]. Важным свойством УЭ, генерируемых у катода, является широкий телесный угол, в который они направлены. Генерации УЭ происходят не только в направлении анода, но и в сторону боковой стенки разрядной камеры [39]. Причем УЭ попадают на боковую стенку не только при формировании широких стримеров [38], но и цилиндрических, формирующихся при использовании катодов с протяженной кромкой, например, в виде трубки [39].

Длительность импульсов тока ПУЭ на оси газового диода (часть полного тока пучка), которые удается выделить с помощью диафрагмы малого диаметра на аноде, определяется в основном процессами у катода. Согласно численному моделированию в [28], генерация и прекращение генерации УЭ определяется ударной ионизацией газа у катода. Вначале на границе расширяющейся катодной плазмы достигается критическое (достаточного для убегания электронов) электрическое поле, а затем оно становится ниже порогового. Характерное время, которое определяется скоростью ионизации в критическом поле и которое обеспечивает убегание электронов, было оценено в 2–3 ps. Экспериментально в [28] при разряде в воздухе атмосферного давления был зафиксирован импульс тока ПУЭ на оси диода длительностью 9 ps. Однако в реальных условиях (без применения диафрагмы), длительность импульса тока ПУЭ за всей поверхностью плоского анода на порядок больше [8,34,35,38].

Длительность ПУЭ на оси газового диода при установке на аноде диафрагмы зависит от многих факторов. При постоянном давлении и сорте газа, а также диаметре диафрагмы на длительность ПУЭ влияют длина межэлектродного промежутка, конструкция катода, амплитуда импульса напряжения генератора и его фронт. Дальнейшие исследования условий генерации ПУЭ с пикосекундным и субпикосекундным временным разрешением могут привести к обнаружению других факторов, влияющих на длительность и форму импульсов ПУЭ.

Также следует принимать во внимание режим генерации УЭ. Как показано в [13,19], наибольшие амплитуды тока ПУЭ регистрируются при одновременном приходе на анод пучка электронов и фронта волны ионизации. В таком режиме вклад в длительность импульса тока пучка дают не только электроны, которые генерируются у катода во время формирования стримера, но и электроны, ускоренные на фронте волны ионизации (стримера) в промежутке и у анода. При генерации ПУЭ реализуются режимы, при которых регистрируются два импульса тока пучка, см. [14,17]. Подробный анализ известных работ, в которых измерялись длительности ПУЭ, приведен во введении настоящей работы.

Кроме того, следует учитывать, что не все УЭ распространяются в направлении анода. Часть из них, стартуя в прикатодной области, распространяется перпендикулярно оси разряда [39]. Для увеличения доли УЭ, направленных в сторону анода, нами использовались конусные изоляторы (рис. 2, а), которые закрывают боковую стенку газового диода. Поверхность изолятора во время генерации ПУЭ заряжалась отрицательно, что приводило к увеличению числа электронов за анодом, а также длительности импульса тока ПУЭ. Отметим, что в [16] число УЭ, попадающих на анод, увеличивалось за счет магнитного поля от соленоидов.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили, что импульсы тока убегающих электронов минимальной длительности регистрируются только при использовании диафрагмы диаметром 1 mm и менее, посредством которой выделяется часть всего потока УЭ. Установлено, что при малых диафрагмах и катоде из трубки, имеющей протяженную кромку малого радиуса кривизны, регистрируются импульсы тока УЭ, состоящие из двух пиков. Это можно объяснить неодновременной эмиссией электронов по длине кромки катода. Показано, что при длительности фронта импульса напряжения 0.3 и 0.7 ns наименьшие длительности импульса тока УЭ наблюдаются при применении катодов в виде конуса или шара малого радиуса и срабатывании одного эмиссионного центра в области максимального электрического поля.

Благодарности

Авторы благодарят Д.В. Рыбку (ИСЭ СО РАН) за помощь в проведении экспериментов с генератором СЛЭП-150М. Авторы также выражают благодарность ООО „Альфа Инструменте“ за предоставленный осциллограф Tektronix DPO75002SX, а также Ю.А. Андреева (ИСЭ СО РАН) за предоставленную кабельную сборку SUCOFLEX 101PEA (HUBER SUHNER).

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014. Исследования на установке с генератором GIN-55-1 выполнены также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта #20-02-00733.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Shevelev, E. Khilkevitch, M. Iliasova, M. Nocente, G. Pautasso, G. Papp, A. Molin, S. Pandya, V. Plyusnin, L. Giacomelli, G. Gorini. Nucl. Fusion, **61** (11), 116024 (2021). <http://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2638>
- [2] R. Kwiatkowski, M. Rabinski, M. Sadowski, J. Zebrowski, P. Karpinski. Eur. Phys. J. Plus, **136** (10), 1 (2021). <http://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01844-8>
- [3] Y. Zhang, L. Hu, R. Zhou, M. Chen, Y. Chao, J. Zhang, P. Li. Fusion Eng. Des., **173**, 112924 (2021). <http://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112924>
- [4] J.R. Dwyer. Phys. Rev. D, **104** (4), 043012 (2021). <http://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.043012>

- [5] M. Heumesser, O. Chanrion, T. Neubert, H. Christian, K. Dimitriadou, F.G. Vazquez, A. Luque, F.P. Invernón, R. Blakeslee, N. Østgaard, V. Reglero. *Geophys. Res. Lett.*, **48** (4), 2020GL090700 (2021). <http://doi.org/10.1029/2020GL090700>
- [6] C. Maiorana, M. Marisaldi, M. Füllekrug, S. Soula, J. Lapierre, A. Mezentssev, C. Skeie, M. Heumesser, O. Chanrion, N. Østgaard, T. Neubert. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **126** (18), e2020JD034432 (2021). <http://doi.org/10.1029/2020JD034432>
- [7] Е.В. Орешкин, С.А. Баренгольц, А.В. Огинов, В.И. Орешкин, С.А. Чайковский, К.В. Шпаков. Письма в ЖТФ, **37** (12), 80 (2011). [E.V. Oreshkin, S.A. Barengol'ts, A.V. Oginov, V.I. Oreshkin, S.A. Chaikovskii, K.V. Shakov. *Tech. Phys. Lett.*, **37** (6), 582 (2011).]
- [8] V. Tarasenko. *Plasma Sources Sci. T.*, **29** (3), 034001 (2020). <http://doi.org/10.1088/1361-6595/ab5c57>
- [9] N.M. Zubarev, V.Y. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, G.A. Mesyats, N.S. Semeniuk, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin. *Plasma Sourc. Sci. T.*, **29** (12), 125008 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abc414>
- [10] J. Qiu, C. Zhang, Z. Liu, B. Huang, T. Shao. *Plasma Sci. Technol.*, **23** (6), 064011 (2021). <http://doi.org/10.1088/2058-6272/abf299>
- [11] G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, O.V. Zubareva, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk. *Appl. Phys. Lett.*, **116** (6), 063501 (2020). <http://doi.org/10.1063/1.5143486>
- [12] C. Köhn, O. Chanrion, K. Nishikawa, L. Babich, T. Neubert. *Plasma Sources Sci. T.*, **29** (3), 035023 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab6e57>
- [13] D.A. Sorokin, D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht. *Appl. Phys. Lett.*, **118** (22), 224101 (2021). <http://doi.org/10.1063/5.0052686>
- [14] Д.В. Белоplotов, В.Ф. Тарасенко, В.А. Шкляев, Д.А. Сорокин. Письма в ЖЭТФ, **113** (2), 133 (2021). [D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, V.A. Shklyayev, D.A. Sorokin. *JETP Lett.*, **113** (2), 129 (2021). DOI: 10.1134/S0021364021020053]
- [15] Н.М. Зубарев, Г.А. Месяц. Письма в ЖЭТФ, **113** (4), 256 (2021). [N.M. Zubarev, G.A. Mesyats. *JETP Lett.*, **113** (4), 259 (2021). DOI: 10.1134/S0021364021040123]
- [16] М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, Г.А. Месяц, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин. Письма в ЖЭТФ, **113** (6), 370 (2021). [M.A. Gashkov, N.M. Zubarev, O.V. Zubareva, G.A. Mesyats, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin. *JETP Lett.*, **113** (6), 370 (2021).]
- [17] D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, V.A. Shklyayev, D.A. Sorokin. *J. Phys. D Appl. Phys.*, **54** (30), 304001 (2021). <http://doi.org/10.1088/1361-6463/abfdde>
- [18] G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev. *J. Phys. Conf. Ser.*, **2064** (1), 012003 (2021). <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012003>
- [19] V.F. Tarasenko, D.A. Sorokin, D.V. Beloplotov, M.I. Lomaev, E.K. Baksht, A.G. Burachenko. *J. Phys. Conf. Ser.*, **2064** (1), 012001 (2021). <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012001>
- [20] D. Levko, S. Yatom, V. Vekselman, J.Z. Gleizer, V.T. Gurovich, Y.E. Krasik. *J. Appl. Phys.*, **111** (1), 013304 (2012). <http://doi.org/10.1063/1.3676198>
- [21] N.Y. Babaeva, G.V. Naidis, D.V. Tereshonok, E.E. Son. *J. Phys. D Appl. Phys.*, **51**, 434002 (2018). <http://doi.org/10.1088/1361-6463/aada74>
- [22] S.Y. Belomytsev, A.A. Grishkov, V.A. Shklyayev, V.V. Ryzhov. *J. Appl. Phys.*, **123** (4), 043309 (2018). <http://doi.org/10.1063/1.5008820>
- [23] Л.В. Тарасова, Л.Н. Худякова, Т.В. Лойко, В.А. Цукерман. ЖТФ, **44** (3), 564 (1974). [L.V. Tarasova, L.N. Khudyakova, T.V. Loiko, V.A. Tsukerman. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **19**, 351 (1974).]
- [24] L.P. Babich. *High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment, and Natural Phenomena* (Futurepast, Arlington, 2003)
- [25] Л.П. Бабич, Т.В. Лойко. ЖТФ, **55** (5), 956 (1985). [L.P. Babich, T.V. Loiko. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **30**, 574 (1985).]
- [26] Е.Н. Бакшт, А.Г. Бураченко, В.Я. Козhevnikov, A.V. Kozyrev, I.D. Kostyrya, V.F. Tarasenko. *J. Phys. D Appl. Phys.*, **43**, 305201 (2010). DOI:10.1088/0022-3727/43/30/305201
- [27] В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко. Изв. вузов. Сер. физ., **58** (12), 31 (2015). [V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko. *Russ. Phys. J.*, **58** (12), 1702 (2016). UDC 621.316.933.6]
- [28] G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, O.V. Zubareva, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk. *Appl. Phys. Lett.*, **116** (6), 063501 (2020). <http://doi.org/10.1063/1.5143486>
- [29] В.М. Ковальчук, Г.А. Месяц, В.Г. Шпак. *Proc. Pulse Power Conf.* (Lubbock, USA, 1976), p. ID5.
- [30] В.Ф. Тарасенко, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин, В.М. Орловский, С.М. Алексеев. Письма в ЖТФ, **29** (21), 1 (2003). [V.F. Tarasenko, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, V.M. Orlovskii, S.M. Alekseev. *Tech. Phys. Lett.*, **29** (11), 879 (2003).]
- [31] С.Б. Алексеев, В.М. Орловский, В.Ф. Тарасенко, А.Н. Ткачев, С.И. Яковленко. ЖТФ, **75** (12), 89 (2005). [S.B. Alekseev, V.M. Orlovskii, V.F. Tarasenko, A.N. Tkachev, S.I. Yakovlenko. *Tech. Phys.*, **50** (12), 1623 (2005).]
- [32] V.F. Tarasenko, S.A. Shunailov, V.G. Shpak, I.D. Kostyrya. *Laser Part. Beams*, **23** (4), 545 (2005). <http://doi.org/10.1017/S0263034605050731>
- [33] Г.А. Месяц, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин. Письма в ЖТФ, **34** (4), 71 (2008). [G.A. Mesyats, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin. *Tech. Phys. Lett.*, **34** (2), 169 (2008). DOI: 10.1134/S1063785008020259]
- [34] V.F. Tarasenko, D.V. Rybka, A.G. Burachenko, M.I. Lomaev, E.V. Balzovsky. *Rev. Sci. Instrum.*, **83**, 086106 (2012). <http://doi.org/10.1063/1.4746378>
- [35] V.F. Tarasenko, D.V. Rybka. *High Voltage*, **1**, 43 (2016). DOI: 10.1049/hve.2016.0007
- [36] V.M. Efanov, M.V. Efanov, A.V. Komashko, A.V. Kirilenko, P.M. Yarin, S.V. Zazoulin. *Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9. Part 5* (Springer, Berlin, 2010)

- [37] Г.А. Аскар'ян. Письма в ЖЭТФ, **1**(3), 44 (1965).
[G.A. Askar'yan. Soviet J. Experiment. Theor. Phys. Lett., **1**, 97 (1965).]
- [38] Д.А. Сорокин, Д.В. Белоплов, А.А. Гришков, В.А. Шкляев, В.Ф. Тарасенко, С.Я. Белокрытцев, М.И. Ломаев. *Высоковольтный наносекундный разряд в неоднородном электрическом поле и его свойства. Серия Излучение. Пучки. Плазма* (СТТ, Томск, 2020), в. 3.
- [39] V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko, I.D. Kostyrya, M.I. Lomaev, D.V. Rybka. Plasma Devices Oper., **16**(4), 267 (2008). <http://dx.doi.org/10.1080/10519990802478847>