

О параметрах пучков убегающих электронов и об электронах с “аномальной” энергией при субнаносекундном пробое газов атмосферного давления¹⁾

В. Ф. Тарасенко²⁾, Е. Х. Бакшт, Д. В. Белоплов, А. Г. Бураченко, И. Д. Костыря, М. И. Ломаев, Д. В. Рыбка, Д. А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, Россия

Поступила в редакцию 16 июля 2015 г.

С реальной пикосекундной точностью исследована генерация пучков убегающих электронов в газах атмосферного давления. Определены их основные параметры. Установлено, что при субнаносекундном фронте импульса напряжения в пучке убегающих электронов, генерируемых в воздухе атмосферного давления, можно выделить три группы электронов. Доказано, что длительность импульса пучка в воздухе атмосферного давления составляет за анодной фольгой ~ 100 пс.

DOI: 10.7868/S0370274X1518006X

Введение. Генерация убегающих электронов в газах высокого давления – фундаментальное физическое явление, определяющее, в частности, формирование диффузных разрядов без источника дополнительной предыонизации [1]. К настоящему времени опубликованы сотни статей, посвященных исследованиям пучков убегающих электронов (ПУЭ) в газах атмосферного давления (см. монографию [2], сборник [3], обзоры [4, 5] и ссылки в них). Однако результаты, полученные в различных научных группах, существенно отличаются. Это связано с несколькими причинами. Во-первых, длительность импульса тока пучка мала и зависит от условий эксперимента, что затрудняет точное измерение амплитуды и длительности ПУЭ даже современными осциллографами. Во-вторых, для измерений необходимы коллекторы, разъемы, кабели и ослабители с пикосекундным временным разрешением. Однако в ряде работ (см., например, статью [6]) сообщается о проведении исследований пикосекундных импульсов, хотя используемая аппаратура не позволяет регистрировать импульсы даже с длительностью 100 пс. К пикосекундному диапазону предлагается относить импульсы с длительностью на полувысоте 1–35 пс, а к субнаносекундному – импульсы с длительностью 35–500 пс. В-третьих, на длительность и амплитуду ПУЭ оказывают сильное влияние конструкция газового диода и катода, величина межэлектродного зазора, фронт

и амплитуда импульса напряжения, состав газового наполнения промежутка и давление газа. Кроме того, на измеряемые величины влияют аппаратура и методики измерений. Также следует иметь в виду, что в неоптимальных условиях параметры ПУЭ изменяются от импульса к импульсу. Это приводит к значительным отличиям данных, полученных в различных работах даже при использовании подобных установок. Например, для числа электронов в [7] было получено $6 \cdot 10^8$, а в [8] – $6.2 \cdot 10^{10}$ электронов.

Цель нашей работы – на основе экспериментальных исследований, проведенных с предельным на данный момент временным разрешением, определить основные параметры пучков убегающих электронов, которые реализуются при субнаносекундном пробое газов атмосферного давления. Комплекс полученных данных является уникальным и приводится впервые.

Экспериментальные установки и методики. Исследования были проведены с использованием пяти экспериментальных установок и трех генераторов наносекундных импульсов с длительностью фронта импульса напряжения от 0.1 до 1 нс и амплитудой импульса напряжения в падающей волне от 40 до 200 кВ. Генератор СЛЭП имел три базовые сборки [8–11]. В первой сборке (СЛЭП-150М) [9] к генератору подключалась дополнительная передающая линия, заполненная трансформаторным маслом, которая заканчивалась газовым диодом (рис. 1).

Во второй сборке [8, 10] дополнительной передающей линии не было (СЛЭП-150). В третьей сборке [11] использовалась дополнительная передающая ли-

¹⁾ См. дополнительные материалы к данной статье на сайте нашего журнала www.jetpletters.ac.ru том 102, вып. 6.

²⁾ e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

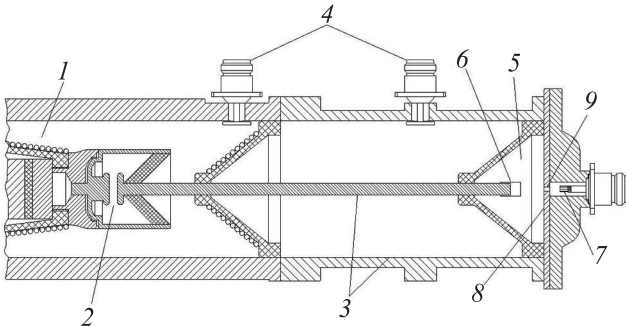


Рис. 1. Конструкции выходной части генератора СЛЭП-150М с газовым диодом и коллектором: 1 – генератор, 2 – обострительный разрядник, 3 – передающая линия, 4 – емкостные делители, 5 – газовый диод, 6 – катод (трубка) из фольги диаметром 6 мм, 7 – коллектор с диаметром приемной части 3 мм, 8 – фольга, 9 – коллиматор с диаметром отверстия 1 мм

ния со срезающим разрядником, заполненная воздухом. Это позволяло формировать импульсы напряжения с длительностью на полувысоте 0.1 и 0.2 нс. Генераторы подключались к разрядным камерам (газовым диодам), заполненным воздухом атмосферного давления. В ряде экспериментов использовались и другие газы (гелий, неон, аргон, криптон, ксенон, азот и SF_6).

Для определения спектра электронов с генератором СЛЭП-150 применялся времяпролетный спектрометр [12], в котором расстояние от фольги до приемной части коллектора составляло ~ 0.5 или ~ 9.5 см. Кроме того, энергия электронов определялась по кривым ослабления ПУЭ [13, 14]. Для ослабления тока ПУЭ использовались фильтры из алюминиевой фольги. Восстановление спектров электронов осуществлялось по специально разработанной программе, где распределение электронов по энергиям рассчитывалось методом регуляризации решения некорректно поставленной задачи для интегрального уравнения Фредгольма при минимальных априорных предположениях [13, 14].

Для измерений электрических импульсов были применены цифровые осциллографы реального времени LeCroy WaveMaster 830Zi-A с полосой пропускания до 30 ГГц и с шагом дискретизации 12.5 пс и Tektronix DSA72504D с полосой пропускания до 30 ГГц и с шагом дискретизации 10 пс. При регистрации импульсов использовались высокочастотный кабель RG58-A/U (Radiolab) длиной 1 м и разъемы типа N (Suhner 11 N-50-3-28/133 NE) и SMA (Radiall R125.075.000).

Отметим, что в наших работах [1, 4, 8–14] и в работах [15, 16] дано подробное описание генераторов,

коллекторов и методик измерений ПУЭ и импульсов напряжения на газовом диоде. В работах же [2, 6, 7] отсутствует описание магнитного спектрометра, цилиндра Фарадея и других важных деталей, существенно влияющих на измеряемые параметры.

Пространственные формы разряда при формировании ПУЭ. При подаче наносекундных импульсов напряжения на промежуток с катодом малого радиуса кривизны в воздухе атмосферного давления и других газах формируется как диффузный (объемный), так и контрагированный разряд [1–5]. Было установлено, что диффузная стадия разряда предшествует контрагированной стадии и в режимах, в которых на интегральной во времени фотографии разряда излучение искры маскирует диффузную стадию разряда. Пучок убегающих электронов в данных условиях экспериментов генерировался во время диффузной стадии разряда. С увеличением длины разрядного промежутка ($d \geq 12$ мм) и сокращением длительности импульса напряжения вероятность формирования диффузного разряда в газовом диоде при атмосферном давлении воздуха увеличивается. При разряде в азоте уменьшения интенсивности излучения в прикатодной области промежутка не наблюдалось, хотя амплитуда ПУЭ в азоте обычно больше, чем в воздухе.

Импульсы напряжения и тока через разрядный промежуток при генерации ПУЭ. На рис. 2 приведены осциллограммы импульса напря-

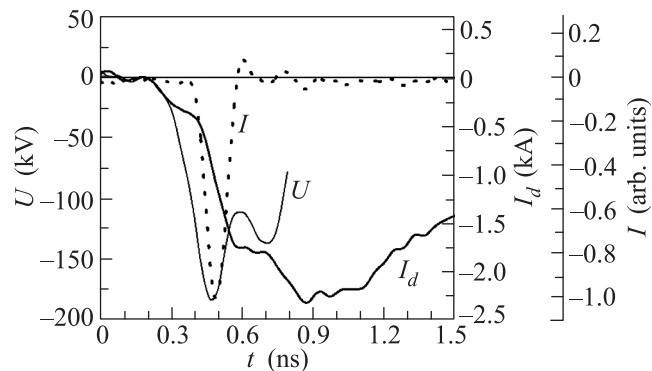


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на промежутке U , тока электронного пучка за фольгой I и тока разряда I_d . Катод (трубка) диаметром 6 мм, межэлектродный зазор 12 мм. Генератор СЛЭП-150М

жения, восстановленного по осциллограммам падающей и отраженной волн напряжения генератора СЛЭП-150М, тока через промежуток и ПУЭ. Время регистрации ПУЭ коллектором относительно фронта импульса напряжения и фронта импульса тока че-

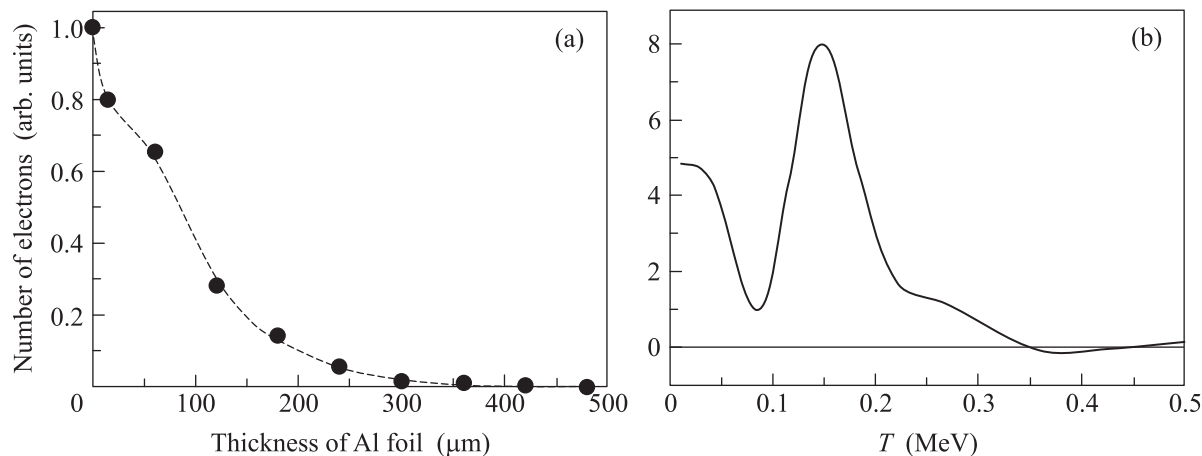


Рис. 3. Экспериментальная (точки) и расчетная (пунктир) кривые ослабления (а) и восстановленный по ним спектр быстрых электронов в диоде с катодом (шар) диаметром 9.5 мм (б). Генератор СЛЭП-150М, межэлектродный зазор 6 мм

рез промежутков с высокой точностью определялось по току смещения с коллектора при замене анодной фольги на сетку [10]. Видно, что в данных условиях пучок начинает регистрироваться коллектором через 0.2 нс после подачи импульса напряжения на промежутки, а амплитудное значение тока ПУЭ достигается в начале спада импульса напряжения на промежутке. На осциллограмме тока разряда начальный участок соответствует току смещения “холодного” диода (току смещения до образования у катода плотной плазмы, из которой вытесняется электрическое поле). Далее происходит увеличение тока через промежутки сначала за счет зарядки сжимающегося конденсатора, образованного между фронтом плотной плазмы и анодом, а затем за счет тока проводимости [17].

Распределение электронов по энергиям. В наших работах [12–14] было показано, что спектр ПУЭ за анодной фольгой, генерируемых в воздухе атмосферного давления при подаче на промежутки импульсов напряжения от генераторов СЛЭП и РАДАН-220, состоит из двух-трех групп. В основную группу входят электроны с энергией, меньшей eU_m , где U_m – максимальное напряжение на промежутке, e – заряд электрона. Эксперименты по отклонению ПУЭ в магнитном поле подтверждают этот результат. Вторая группа электронов имеет энергии в области 50–70 кэВ и менее. Электроны третьей малочисленной группы (электроны с “аномальной” энергией) имеют энергию $T > eU_m$. Число электронов в каждой из групп зависит от условий эксперимента и конструкции катода. Для увеличения числа электронов в третьей группе надо использовать катоды с относительно большим радиусом кривизны. Однако

при этом ухудшается стабильность параметров тока пучка.

В работах [2] (см. с. 183) и [6] утверждается, что при межэлектродном зазоре 2 см и напряжении на промежутке $U_m = 190$ кВ максимум на распределении электронов по энергиям соответствует энергии 290 кэВ. При этом большая часть электронов пучка имеет энергию, превышающую eU_m . В работе [7] эти результаты были изменены. Максимум на распределении электронов по энергиям был уменьшен до 270 кэВ (с. 293), а напряжение на промежутке увеличено до 270 кэВ (с. 288). Отметим, что авторы работы [15] предполагают, что максимальная энергия электронов не должна превышать eU_m .

Нами были проведены подробные исследования спектров пучков электронов, генерируемых в газовых диодах [12–14]. На рис. 3 приведены кривая ослабления и восстановленный из нее спектр электронов при катоде в виде шара. Максимальное напряжение на промежутке для этих условий составило 210 кВ. На спектре можно выделить три группы электронов, причем энергия электронов третьей группы > 210 кВ. Однако, число электронов третьей группы в оптимальных условиях не превышало 10 % от числа электронов за фольгой и менялось от импульса к импульсу.

Наличие трех групп электронов следует из кривой ослабления (рис. 3а), которая отличается от приводимых в [2, 6] характерными перегибами при энергиях ~ 20 и ~ 180 кэВ. Три группы электронов также были зарегистрированы с помощью времяпролетного спектрометра [10].

Длительность импульса тока пучка убегающих электронов. Впервые о регистрации с по-

мощью коллектора импульса ПУЭ с длительностью на полувысоте ~ 100 пс было сообщено в работе [18]. Указанная длительность соответствовала предельному временному разрешению используемого в [18] осциллографа. Однако, как позднее было показано в работах [8, 10], она оказалась равной средним длительностям импульсов ПУЭ, регистрируемых за фольгой газового диода в данных условиях. На рис. 4 приведены осциллограммы импульсов ПУЭ, полу-

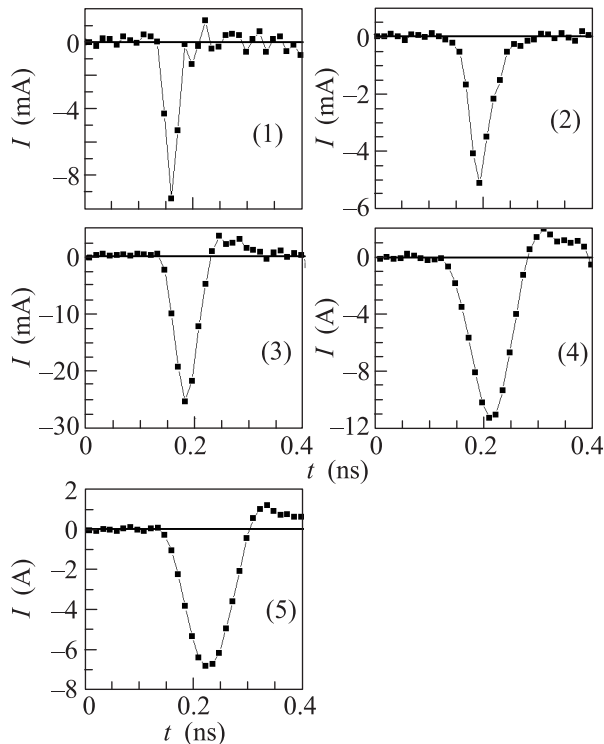


Рис. 4. Осциллограммы импульсов ПУЭ. Катод (шар), межэлектродный зазор 6 мм (1); катод (трубка), зазор 12 мм (2–5). Коллектор с диаметром приемной части 3 мм (1–3) и 20 мм (4, 5), отверстие в коллиматоре 1 мм (1, 2), 4 мм (3) и 18 мм (5)

ченные с помощью различных коллекторов и катодов, а также коллиматоров. Импульс ПУЭ (1) был зарегистрирован коллектором с приемной частью 3 мм за коллиматором толщиной 5 мм с отверстием диаметром 1 мм. Длительность импульса для сферического катода и межэлектродного промежутка 6 мм составила на полувысоте $\cong 25$ пс. Минимальные длительности импульсов тока пучка регистрируются при сферических и конусных катодах с малыми межэлектродными зазорами (2–6 мм). Регистрация импульсов ПУЭ с длительностью на полувысоте $\cong 25$ пс однозначно доказывает пикосекундное разрешение системы регистрации. При переходе к катоду в виде трубки с длинной, эмитирующей электро-

ны, кромки 19 мм, а также при увеличении межэлектродного зазора длительность импульса тока пучка увеличивается. Импульс (2) имеет длительность на полувысоте $\cong 40$ пс. Еще больше длительность импульса ПУЭ возрастает при увеличении диаметра отверстия в коллиматоре и уменьшении его толщины. При использовании коллиматора из меди толщиной 250 мкм с отверстием диаметром 4 мм длительность импульса ПУЭ на полувысоте составила $\cong 45$ пс (импульс (3)).

Импульс (4) с длительностью на полувысоте $\cong 80$ пс, демонстрирующий разрешающую способность коллектора с диаметром приемной части 20 мм, был получен без коллиматора. Типичную длительность тока ПУЭ ~ 100 пс с большей части анодной фольги имеет импульс (5), который был получен с помощью данного коллектора за коллиматором из меди с диаметром отверстия 18 мм. Подобные длительности регистрировались при использовании катодов различной конструкции, а также в азоте и других газах. Это однозначно доказывает, что длительность импульсов ПУЭ за анодной фольгой газовых диодов составляет ~ 100 пс, а не менее 50 нс, как утверждалось в работах [6, 19]. Отметим, что впервые уменьшение длительности ПУЭ при уменьшении размеров коллектора было зарегистрировано в работе [20].

Наибольшие амплитуды ПУЭ в воздухе атмосферного давления были получены с генератором СЛЭП-150 при амплитуде падающей волны напряжения 200 кВ и катоде из параллельно натянутых проволок, которые закреплялись на кольце диаметром 40 мм [8]. Число электронов в пучке достигало $6.2 \cdot 10^{10}$, что при длительности импульса на полувысоте ~ 100 пс соответствует амплитуде ПУЭ 100 А.

Выводы. Генерация убегающих электронов в газах атмосферного давления представляет собой фундаментальное физическое явление, которое оказывает существенное влияние на процессы при наносекундных разрядах. В настоящей работе показано, что за счет применения коллиматора с отверстием диаметром 1 мм и менее, коротких межэлектродных промежутков и катодов с малой площадью острой кромки можно выделить часть убегающих электронов пучка и зарегистрировать импульсы с длительностью на полувысоте около 25 пс. Доказано, что длительность импульса тока ПУЭ, регистрируемого за фольгой газового диода в воздухе атмосферного давления и других газах, составляет ~ 100 пс. Подтверждено, что спектр пучка убегающих электронов при субнаносекундном пробое состоит из двух-трех групп электронов с различны-

ми энергиями. При этом число электронов в третьей группе (электроны с “аномальной” энергией) с оптимальным сферическим катодом не превышает 10% от общего числа электронов ПУЭ. За анодной фольгой зарегистрировано $6.2 \cdot 10^{10}$ электронов, что при длительности импульса на полувывоте ~ 100 пс соответствует амплитуде тока ПУЭ 100 А.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект # 14-29-00052).

1. *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges*, ed. by V. F. Tarasenko, Nova Science Publishers. Inc, N.Y., USA (2014).
2. L. P. Babich, *High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment, and Natural Phenomena*, Futurepast Inc. Arlington, VA, USA (2003).
3. *Пучки убегающих электронов и разряды на основе волны размножения электронов фона в плотном газе*, под ред. С. И. Яковленко, Труды ИОФАН, М. (2007), т. 63.
4. V. F. Tarasenko, E. K. Baksht, A. G. Burachenko, I. D. Kostyrya, M. I. Lomaev, and D. V. Rybka, *Plasma Dev. Oper.* **16**, 267 (2008).
5. D. Levko, Ya. E. Krasik, and V. F. Tarasenko, *Int. Rev. Phys.* **6**, 165 (2012).
6. L. P. Babich and T. V. Loiko, *Письма в ЖЭТФ* **101**, 830 (2015).
7. Л. П. Бабич, Т. В. Лойко, *Физика плазмы* **36**, 287 (2010).
8. И. Д. Костыря, Д. В. Рыбка, В. Ф. Тарасенко, *ПТЭ* **1**, 80 (2012).
9. V. F. Tarasenko, I. D. Kostyrya, E. K. Baksht, and D. V. Rybka, *IEEE Trans. on Diel. and Electr. Insulation.* **18**, 1250 (2011).
10. В. Ф. Тарасенко, *Физика плазмы* **37**, 444 (2011).
11. В. Ф. Тарасенко, А. Г. Бураченко, Е. Х. Бакшт, И. Д. Костыря, М. И. Ломаев, Д. В. Рыбка, *ПТЭ* **3**, 59 (2009).
12. В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, А. Г. Бураченко, И. Д. Костыря, М. И. Ломаев, В. К. Петин, Д. В. Рыбка, С. В. Шляхтун, *Физика плазмы* **34**, 1110 (2008).
13. E. H. Baksht, A. G. Burachenko, V. Yu. Kozhevnikov, A. V. Kozyrev, I. D. Kostyrya, and V. F. Tarasenko, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 305201 (2010).
14. A. V. Kozyrev, V. Yu. Kozhevnikov, M. S. Vorobyev, E. Kh. Baksht, A. G. Burachenko, N. N. Koval, and V. F. Tarasenko, *Laser and Particle Beams* **33**, 183 (2015).
15. G. A. Mesyats, A. G. Reutova, K. A. Sharypov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, and M. I. Yalandin, *Laser Part. Beams* **29**, 425 (2011).
16. K. A. Sharypov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. R. Ul'masculov, and M. I. Yalandin, *Rev. Sci. Instr.* **84**, 055110 (2013).
17. T. Shao, V. F. Tarasenko, Ch. Zhang, A. G. Burachenko, D. V. Rybka, I. D. Kostyrya, M. I. Lomaev, E. Kh. Baksht, and P. Yan, *Rev. Sci. Instr.* **84**, 053506 (2013).
18. V. F. Tarasenko, S. A. Shunailov, V. G. Shpak, and I. D. Kostyrya, *Laser Particle Beams* **23**, 545 (2005).
19. Г. А. Месяц, В. Г. Шпак, С. А. Шунайлов, М. И. Яландин, *Письма в ЖТФ* **34**, 71 (2008).
20. В. Ф. Тарасенко, С. И. Яковленко, В. М. Орловский, А. Н. Ткачев, С. А. Шунайлов, *Письма в ЖЭТФ* **77**, 737 (2003).