

О механизме генерации сверхкоротких лавинных электронных пучков при наносекундном разряде в газах повышенного давления

В.Ф. Тарасенко*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 27.07.2009 г.

Приведены результаты исследований пучков убегающих электронов в газах повышенного давления. Показано, что при заданном давлении газа наибольшие амплитуды сверхкоротких лавинных электронных пучков достигаются при диффузном разряде и ускорении электронов между фронтом волны ионизации, который распространяется со скоростью до 10 см/нс, и анодом.

Ключевые слова: убегающие электроны, пучки электронов при разряде в газах, механизм генерации, СЛЭП, рентгеновское излучение; runaway electrons, electron beams in gas discharge, generation mechanism, SAEB, X-ray.

Введение

Об ускорении электронов до высоких энергий в газах повышенного давления (генерации убегающих электронов) известно с середины 60-х гг. [1, ссылки]. Это явление имеет место в атмосферных разрядах Земли [2] и в лабораторных экспериментах. В лабораториях за фольгой газовых диодов были зарегистрированы как импульсы рентгеновского излучения, так и пучки убегающих электронов [1, 3–13]. Данный эффект наиболее легко наблюдать при разряде в неоднородном электрическом поле. При этом катод должен иметь малый радиус кривизны, а на промежутке должны подаваться импульсы напряжения наносекундной длительности с амплитудой в десятки—сотни киловольт.

Генерация убегающих электронов за счет усиления электрического поля на электродах и в промежутке является обычным явлением при импульсных разрядах в неоднородном электрическом поле. Однако их регистрация требует применения специальных методик и аппаратуры [4]. Для получения сверхкоротких лавинных электронных пучков (СЛЭП) с максимальными амплитудами необходимо правильно понимать механизм генерации убегающих электронов в газовых диодах, а также создавать газовые диоды и катоды оптимальной конструкции. Так, удачный выбор конструкции газового диода и катода позволил в работах [3–9] увеличить более чем на порядок число убегающих электронов, регистрируемых за фольгой газового диода, по сравнению с числом убегающих электронов, зарегистрированных

в работах, выполненных до 2002 г. [1, ссылки]. Однако механизм генерации пучков убегающих электронов при наносекундных разрядах в газах повышенного давления, предлагаемый различными авторами, существенно отличается [1–15].

В работах Л.П. Бабича вначале предполагалось (см., например, [10]), что убегающие электроны генерируются за счет стохастического ускорения части электронов автоэмиссионных пучков в прикатодной плазме наносекундных разрядов. Позднее был предложен другой механизм генерации убегающих электронов [11], согласно которому в воздухе атмосферного давления убегающие электроны генерируются в прикатодной области за счет самоускорения на фронте поляризуемого стримера. При этом основное число электронов пучка имеет «аномальную» энергию. Под «аномальной» энергией понимается энергия электронов $T > eU_{\max}$, где U_{\max} — максимальное напряжение на промежутке.

Авторы [12] предполагают, что пучок убегающих электронов формируется в плазме микроканалов, в которых усиливается электрическое поле, а концентрация частиц в микроканалах может уменьшаться за счет теплового расширения. В [13] предполагается, что убегающие электроны являются автоэмиссионными, а прекращение их генерации происходит за счет взрывной электронной эмиссии. При этом истинная длительность тока пучка убегающих электронов должна составлять примерно 10^{-11} с. В работах [3–9] был предложен и развит механизм, в котором генерация убегающих электронов с максимальными амплитудами тока пучка обусловлена ускорением основного числа электронов между фронтом плотной плазмы и анодом. Плотная плазма образуется у катода за счет концентрации электрического поля, начальной предыонизации быстрыми электронами и формирования электронных лавин.

* Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

В настоящей статье рассмотрено влияние различных факторов на механизм генерации пучков убегающих электронов в режимах генерации СЛЭП с максимальными амплитудами.

О механизме генерации убегающих электронов в газах повышенного давления

Эффект генерации убегающих электронов в сильных электрических полях, которые возникают при грозных разрядах в атмосфере Земли, был предложен в [14]. Суть его состоит в том, что в достаточно сильном электрическом поле электрон на длине свободного пробега может получать от поля больше энергии, чем потеряет в столкновениях. Соответственно энергия этих электронов будет увеличиваться. В [2] было показано, что электроны с большей начальной энергией могут переходить в режим убегания при меньших электрических полях в промежутке. Это связано с тем, что при увеличении энергии электронов > 100 эВ потери их энергии при столкновениях с частицами газа монотонно с ростом энергии уменьшаются.

Нелокальный критерий убегания электронов для однородного электрического поля был получен в работах С.И. Яковленко [15]. Этот критерий определяет с учетом размножения электронов в газе критическое значение напряженности поля E_{cr} и имеет вид $\alpha_i(E_{cr}, p)d = 1$, где α_i — коэффициент ионизации; p — давление газа; d — межэлектродный промежуток. При $E > E_{cr}$ большинство электронов переходит в режим убегания.

Экспериментальные установки и методики

В экспериментах использовались два импульсных наносекундных генератора, к которым подключались газовые диоды с катодами различной конструкции, подробное описание приведено в [4, 8, 9]. Анодом в газовом диоде служила алюминиевая фольга толщиной 10–500 мкм. В ряде экспериментов СЛЭП выводился через диафрагмы с диаметром отверстия 1–10 мм, которые устанавливались за фольгой. В качестве катода использовались трубки с различной толщиной стенок, стержни, иглы и шары. Все катоды изготовлялись из нержавеющей стали. На промежуток подавались импульсы напряжения от генераторов СЛЭП-150 и РАДАН-220. Генератор СЛЭП-150 (без передающей линии) формировал на высокоомной нагрузке импульсы напряжения амплитудой ~ 150 кВ. Амплитуда падающей волны в передающей линии при фронте импульса ~ 250 пс на уровне 0,1–0,9 составляла ~ 130 кВ. Длительность импульса напряжения на полувысоте в случае согласованной нагрузки была ~ 1 нс. Генератор РАДАН-220 формировал импульсы напряжения с фронтом ~ 500 пс и амплитудой на высокоомной нагрузке ~ 250 кВ. Длительность импульса на

полувысоте в случае согласованной нагрузки составляла ~ 2 нс. Подключение генераторов к газовому диоду осуществлялось с минимальной индуктивностью.

В ряде экспериментов амплитуда импульса напряжения и длительность фронта импульса за счет дополнительной индуктивности между катодом и генератором изменялись. Это позволило получить данные об амплитуде СЛЭП при различных длительностях фронта и амплитудах импульса напряжения. Кроме того, применение срезающего разрядника на генераторе СЛЭП-150 дало возможность провести исследования при длительностях импульса напряжения на полувысоте 100 и 200 пс [9]. Амплитуда тока пучка убегающих электронов за фольгой определялась с помощью коллекторов. Экспозиционная доза рентгеновского излучения регистрировалась дозиметром Arraw-Tech, Inc (Model 138). Форма импульсов рентгеновского излучения и их относительная амплитуда определялись алмазным детектором компании AASC, временное разрешение которого составляло $\sim 0,2$ нс. Кроме того, рентгеновское излучение и электронный пучок фиксировались по засветке пленки РФ-3, которая помещалась в черную бумагу толщиной ~ 100 мкм. Электрические сигналы регистрировались осциллографами TDS-6604 (6 ГГц, 20 выборок в 1 нс) или DPO70604 (6 ГГц, 25 выборок в 1 нс). Методики измерений подробно описаны в [4, 8].

Результаты экспериментов

Наиболее важные экспериментальные результаты иллюстрируют рис. 1 и 2.

На рис. 1 приведены осциллограммы подающей на промежуток волны напряжения, на которую наложена отраженная волна напряжения U , и осциллограммы тока пучка электронов I за фольгой при двух разных давлениях гелия. При давлении 22 торр (рис. 1, а) и ниже (U_1, I_1) режим генерации электронного пучка близок к режиму, который реализуется в вакуумном диоде. Длительность импульса тока пучка на полувысоте при давлении 22 торр составила $\sim 0,4$ нс, фронт импульса пологий. Спад тока пучка связан с замыканием плазмой промежутка и уменьшением напряжения на промежутке. При увеличении давления гелия режим генерации тока пучка, как и в работе [7], принципиально изменяется. Фронт и спад импульса тока пучка сокращаются, а максимум СЛЭП при давлении 60 торр регистрируется на 0,3 нс раньше, чем при давлении 22 торр (рис. 1, б). Отметим, что при переходе к режиму генерации СЛЭП амплитуда тока пучка за фольгой может превышать амплитуду тока пучка, полученную при более низком давлении (в условиях вакуумного диода).

На рис. 2 показано интегральное свечение разряда в воздухе при атмосферном давлении и длительности импульса напряжения на согласованной нагрузке ~ 2 и $\sim 0,2$ нс. При межэлектродном зазоре 16 мм и длительности импульса напряжения ~ 1 нс и более диффузное свечение заполняет весь промежуток (рис. 2, а). В этих условиях регистрируются

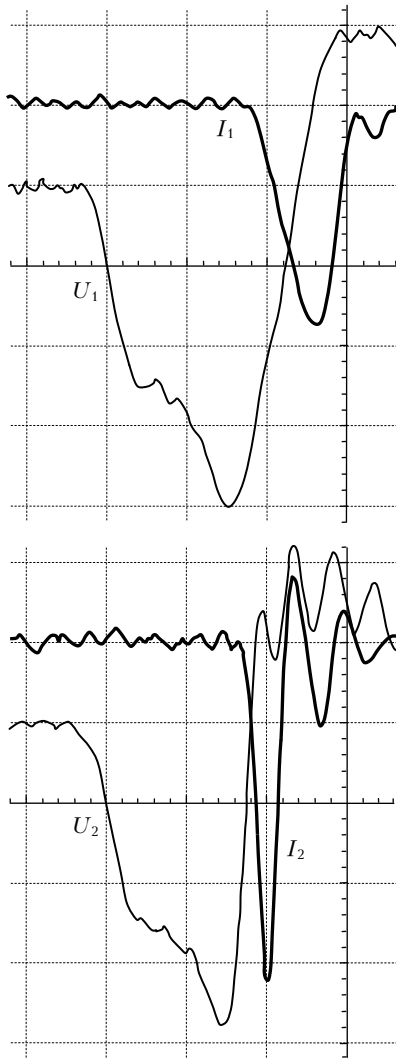


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения U и тока пучка I за фольгой газового диода при давлении гелия 22 (U_1, I_1) и 60 торр (U_2, I_2). Генератор СЛЭП-150, зазор 12 мм. Масштаб по горизонтали 500 пс/дел., масштаб по вертикали для напряжения 50 кВ/дел. и для тока 37 А/дел.

наибольшие амплитуды тока пучка за фольгой при длительности импульса СЛЭП на полувывоте ~ 100 пс [4–9]. В легких газах (гелий, неон, водород) при одинаковых давлениях амплитуда тока пучка увеличивается в несколько раз (вплоть до порядка).

Дальнейшее увеличение амплитуды СЛЭП регистрируется при уменьшении давления гелия и других газов. На рис. 1, б приведена осциллограмма импульса тока пучка длительностью ~ 120 пс на полувывоте, что соответствует режиму генерации СЛЭП. Амплитуда тока пучка за диафрагмой диаметром 10 мм составила ~ 150 А. Со всей поверхности фольги амплитуда СЛЭП, как было показано ранее [4, 8], в несколько раз больше.

О механизме генерации СЛЭП

Для анализа механизма СЛЭП использованы экспериментальные данные, представленные выше, и данные [4–9]. Отметим, что механизм генерации пучков убегающих электронов очень сложен и изменяется в различных условиях. Электроны могут переходить в режим убегания в прикатодной области за счет концентрации электрического поля на микро- и макронеоднородностях катода или(и) за счет избыточного заряда положительных ионов. При малых давлениях газа критическое поле может достигаться по всей длине промежутка. В данном разделе будет рассмотрен механизм генерации СЛЭП в условиях генерации токов пучка с наибольшими амплитудами за анодной фольгой.

Генерация СЛЭП происходит в две стадии. На первой стадии электроны начинают извлекаться с катода за счет автоэлектронной эмиссии. Как мы уже отмечали, катод имеет малый радиус кривизны, и микро-неоднородности на нем дополнительно увеличивают напряженность электрического поля. Авторы работ [13, 16] также считают, что вначале с катода электроны эмитируются за счет автоэлектронной эмиссии. Часть электронов, которые предлагается называть быстрыми электронами [3, 4, 8], за счет концентрации

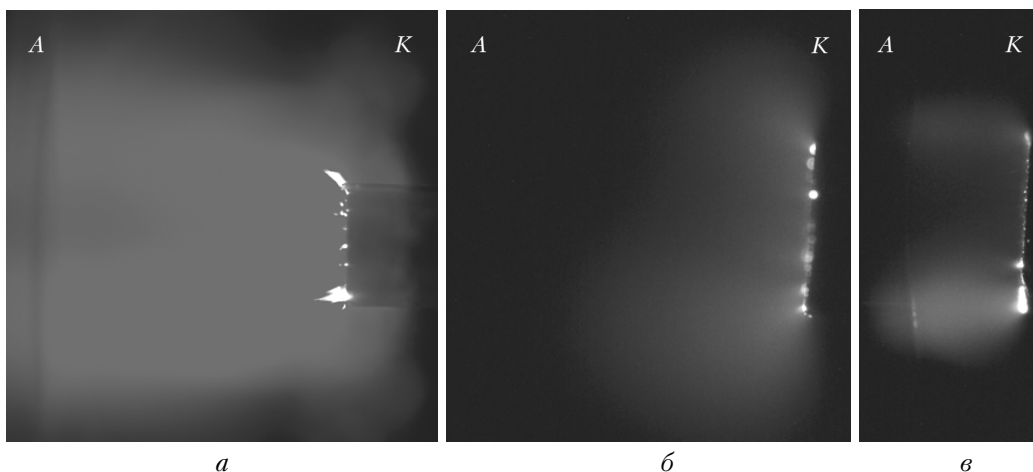


Рис. 2. Интегральное свечение разряда за импульс при давлении воздуха 1 атм и межэлектродных зазорах 16 (а, б) и 4 мм (в), полученное с генераторами РАДАН-220 (а) и СЛЭП-150 (б, в), которые подключались к катоду справа

электрического поля на микро- и макронеоднородностях катода переходит в режим убегания. Эти электроны ионизуют газ и создают у катода начальные электроны, которые инициируют лавины.

Концентрация начальных электронов у катода достаточна для перекрытия головок электронных лавин до достижения лавинами критического размера и образования стримера. Соответственно у катода за короткое время формируется облако плотной диффузной плазмы (рис. 2, б). В этой стадии ток разряда вместе с емкостным током при субнаносекундном фронте импульса напряжения достигает сотен ампер [9] и автоэлектронная эмиссия переходит во взрывную. На рис. 2, б при формировании коронного разряда хорошо видны катодные пятна. Кроме того, излучение из прикатодной плазмы приводит к фотоэмиссии из катода. Видно, что диффузный разряд примыкает к боковой поверхности катода.

Отметим, что электрическое поле у катода дополнительно усиливается за счет положительного заряда ионов. При установке коллектора со стороны, противоположной от анода, нами были за сетчатым катодом зафиксированы положительный потенциал облака ионов, а также электронный пучок, направленный в противоположную от анода сторону.

Генерация основного числа убегающих электронов происходит во второй фазе и обусловлена достижением критического поля между фронтом плотной плазмы (фронтом волны ионизации) и анодом. В этом случае на электроны, которые движутся синхронно с фронтом волны ионизации, оказывают влияние как отрицательный заряд головок лавин, так и электрическое поле в промежутке, которое усиливается вследствие его вытеснения из плотной плазмы.

Экспериментально установлено, что при использовании генератора СЛЭП-150 напряжение на промежутке начинает спадать через 200–500 пс [8, 9]. За это время фронт волны ионизации достигает анода и во всем промежутке нарастает ионизация. Пучок электронов регистрируется за фольгой около максимума напряжения [8]. Оценки показывают, что скорость волны ионизации в этих условиях достигает ~ 10 см/нс. На длительность импульса СЛЭП на полувысоте влияют время достижения критического поля между фронтом волны ионизации и анодом, а также время прихода волны ионизации на анод. Причем разница во времени приходе фронта волны ионизации и убегающих электронов к различным участкам анода, а также напряжение на промежутке в основном определяют длительность импульса СЛЭП, которая составляет 100–200 пс [8].

Достижение критического поля между фронтом плотной плазмы и анодом позволяет увеличивать давление газа в промежутке, при котором за анодом газового диода регистрируется СЛЭП. Так, в гелии СЛЭП был зарегистрирован при давлении 15 атм, в азоте 5 атм, а в ксеноне и элегазе при давлении 2 атм [8]. Только влиянием волны ионизации на ускорение электронов при повышенных давлениях можно объяснить получение токов СЛЭП в данных условиях с амплитудами в десятки–сотни ампер, а также

генерацию убегающих электронов с «аномальной» энергией. На рис. 1 видны сокращения фронта тока пучка до ~ 100 пс и времени спада напряжения на промежутке при переходе в режим генерации СЛЭП.

Сокращение фронта импульса тока можно связать с синхронным движением фронта волны ионизации и электронов пучка. При уменьшении давления в газовом диоде до единиц–десятков торр критическое поле достигается во всем промежутке, что обычно приводит к увеличению длительности импульса (см. рис. 1, а), а при малых зазорах – и амплитуды тока пучка.

Механизм генерации убегающих электронов у катода за счет самоускорения на фронте поляризуемого стримера [1, 11] не подтверждается в наших экспериментах. При стримерном характере разряда ток пучка существенно уменьшается. При максимальных токах СЛЭП доля электронов с аномальной энергией мала. Также наши результаты не могут быть объяснены тем, что пучок убегающих электронов формируется в плазме микроканалов, в том числе при уменьшении концентрации частиц за счет теплового расширения [12]. Во-первых, в промежутке и у катода формируется диффузный разряд. Во-вторых, пучок электронов был зарегистрирован через 100–500 пс после подачи импульса, а тепловое расширение тяжелых частиц газа за это время несущественно.

Заключение

Таким образом, полученные экспериментальные данные и анализ известных результатов подтверждают механизм генерации пучков убегающих электронов, который был предложен в [3] и развит в [4–9]. СЛЭП был зарегистрирован как при высоких (в гелии при 15 атм), так и при низких (единицы–десятки торр) давлениях в газовом диоде. Генерация СЛЭП с наибольшими амплитудами реализуется при достижении критического поля между фронтом волны ионизации и анодом. При этом скорость фронта волны ионизации достигает ~ 10 см/нс. Для получения СЛЭП с максимальными амплитудами и длительностью импульса на полувысоте ~ 100 пс газовый диод необходимо заполнять гелием при давлении 50–100 торр.

Автор благодарит сотрудников лаборатории оптических излучений (ИСЭ СО РАН) Е.Х. Бакшта, А.Г. Бураченко, И.Д. Костырю, М.И. Ломаева, Д.В. Рыбку за сотрудничество в получении результатов, представленных в данной статье.

1. Babich L.P. High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment, and Natural Phenomena. (ISTC Science and Technology Series. V. 2). Arlington, VA: Futurepast, 2003. 358 с.
2. Гуревич А.В., Зыбин К.П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // Успехи физ. наук. 2001. Т. 171. № 11. С. 1177–1199.
3. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. Формирование пучка электронов и объемного разряда в воздухе при атмосферном давлении // Изв. вузов. Физ. 2003. Т. 46. № 3. С. 94–95.

4. *Тарасенко В.Ф., Рыбка Д.В., Бакут Е.Х., Костыря И.Д., Ломаев М.И.* Генерация и измерение субнаносекундных пучков электронов в газонаполненных диодах // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 2. С. 62–68.
5. *Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* О влиянии поперечного магнитного поля на генерацию электронного пучка в газовом диоде // Ж. техн. физ. 2008. Т. 78. Вып. 6. С. 143–145.
6. *Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* Генерация сверхкороткого лавинного электронного пучка при наносекундном разряде в плотных газах // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 8. С. 732–736.
7. *Бакут Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф.* О влиянии давления гелия на амплитуду и длительность тока пучка электронов в газовом диоде // Ж. техн. физ. 2008. Т. 78. Вып. 12. С. 29–34.
8. *Tarasenko V.F., Baksh E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V.* Generation of supershort avalanche electron beams and formation of diffuse discharges in different gases at high pressure // Plasma Devices and Operations. 2008. V. 16. N 4. P. 267–298.
9. *Tarasenko V.F., Baksh E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V.* Supershort avalanche electron beams in discharges in air and other gases at high pressure // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37. N 6. P. 832–838.
10. *Бабиц Л.П.* О стохастическом ускорении электронов в наносекундных разрядах // Ж. техн. физ. 1974. Т. 44. Вып. 9. С. 1846–1850.
11. *Бабиц Л.П., Березин И.А., Лойко Т.В., Тарасов М.Д.* Роль ускорительных процессов в формировании наносекундных разрядов в плотных газах // Изв. вузов. Радиофиз. 1982. Т. 25. № 10. С. 1131–1137.
12. *Карелин В.И., Тренькин А.А.* О высокоэнергетических электронах в высоковольтных наносекундных разрядах, развивающихся в режиме микроструктурирования токовых каналов // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 9. С. 37–43.
13. *Месяц Г.А.* Об источнике убегающих электронов в импульсном газовом разряде // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85. Вып. 2. С. 119–122.
14. *Wilson C.T.R.* The acceleration of β -particles in strong electric fields such as those of thunderclouds // Proc. Cambridge Philos. Soc. 1924. V. 22. P. 534–538.
15. *Yakovlenko S.I.* Escaping Electrons and Discharges Based on the Background-Electron Multiplication Wave for the Pumping of Lasers and Lamps // Laser Phys. 2006. V. 16. N 3. P. 403–426.
16. *Бабиц Л.П., Лойко Т.В., Шамраев Б.Н.* К вопросу об усилении поля в прикатодной области наносекундных разрядов в плотных газах // Изв. вузов. Радиофиз. 1979. Т. 22. № 1. С. 100–105.

V.F. Tarasenko. On the mechanism of supershort avalanche electron beam generation at a nanosecond discharge at elevated pressure of gases.

The paper presents the analysis of conditions for runaway electron beam generation at a nanosecond discharge at elevated pressure of gases. Generation of supershort avalanche electron beam is conditioned by achievement of the critical field between the ionization wave front and anode.