

03;04;10

## **Ток разряда и ток сверхкороткого лавинного пучка электронов при объемном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле**

© *Е.Х. Бакшт, М.И. Ломаев, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск  
E-mail: VFT@loi.ncei.tsc.ru

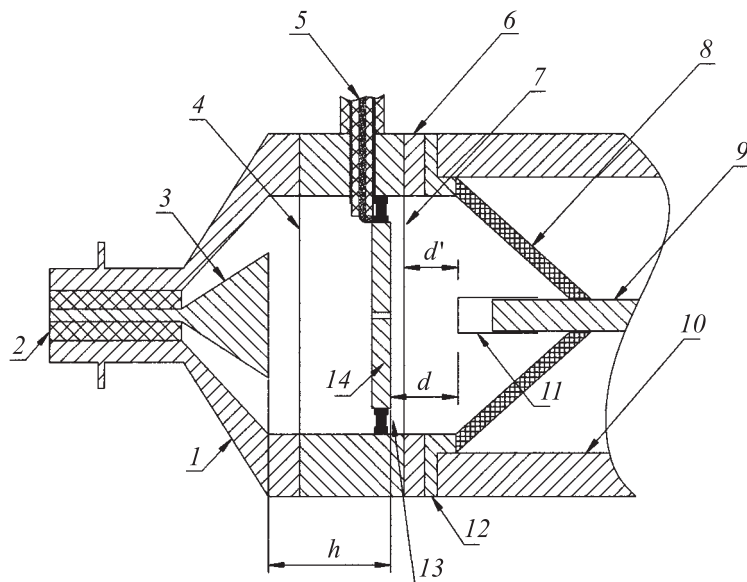
*Поступило в Редакцию 7 сентября 2006 г.*

При наносекундном пробое воздуха атмосферного давления в неоднородном электрическом поле и формировании объемного разряда определено время генерации сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) относительно фронта тока разряда. Показано, что максимум тока СЛЭП регистрируется на фронте импульса тока разряда перед пиком тока разряда емкости газового диода, опережая этот пик на  $\sim 100$  ps. Зарегистрированы токи смещения с амплитудой более одного килоампера. Амплитуда тока смещения возрастает за счет зарядки конденсатора, образованного плотной плазмой, фронт которой расширяется от катода, и плоским металлическим анодом.

PACS: 52.80.Tn, 85.45.-w

1. В последние годы возрос интерес к изучению наносекундных разрядов в газах повышенного давления, формируемых в неоднородном электрическом поле [1–7]. В работах [1–6] использовался катод с малым радиусом кривизны, а на промежуток подавались импульсы высокого напряжения с амплитудой до 400 kV. При формировании таких разрядов регистрируются убегающие электроны и(или) рентгеновское излучение [1–7], а разрядная плазма может использоваться в качестве источника спонтанного и лазерного излучения [8–10], а также как источник рентгеновского излучения с высокой частотой следования импульсов (до 3 kHz [11]). Однако вольт-амперные характеристики наносекундных разрядов изучены слабо, прежде всего из-за сложностей регистрации импульсов тока разряда с субнаносекундным разрешением.

Цель данной работы — изучить характер протекания тока разряда в газовом диоде, используемом для формирования сверхкороткого



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — коллектор, 2 — BNC-разъем, 3 — приемная часть коллектора, 4 — алюминиевая фольга толщиной  $10\ \mu\text{m}$ , 5 — регистрационный кабель токового шунта, 6 — металлическое кольцо, 7 — AlBe фольга, 8 — изолятор, 9 — катододержатель, 10 — корпус генератора РАДАН-220, 11 — катод, 12 — металлический держатель изолятора, 13 — пленочный чип-резистор, 14 — анод.  $d$ ,  $d'$  — расстояние между анодом и катодом,  $h$  — расстояние от анода до приемной части коллектора.

лавинного электронного пучка, и определить время генерации СЛЭП относительно импульса тока разряда.

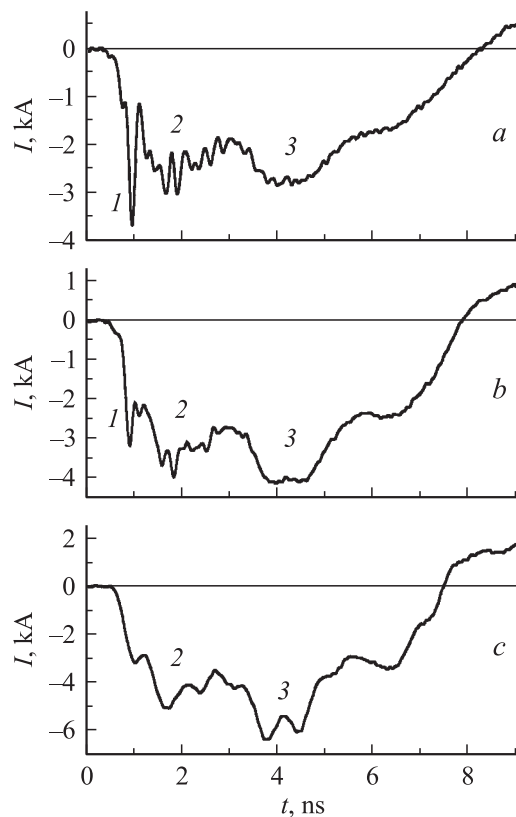
2. При проведении работы применялись разрядная камера и импульсные генераторы РАДАН-220 [12] и SM-3NS [13]. Схема регистрации и конструкция разрядной камеры при использовании генератора РАДАН-220 показаны на рис. 1. Генератор РАДАН-220 имел волновое сопротивление  $\sim 20\ \Omega$  и формировал на разрядном промежутке импульс напряжения с амплитудой до  $\sim 220\ \text{kV}$  (напряжение холостого хода генератора) и длительностью на полувысоте  $\sim 2\ \text{ns}$  при фронте импульса напряжения в передающей линии  $\sim 0.5\ \text{ns}$ . Внутренний

диаметр газового диода равнялся  $\sim 50$  nm. Использовались плоский анод и катод с малым радиусом кривизны, что приводило к усилению электрического поля у катода. Катод был выполнен в виде трубки из стальной фольги диаметром  $\sim 6$  mm и толщиной  $50$   $\mu$ m (№ 1) или в виде конуса с углом у вершины  $15^\circ$ . Катоды закреплялись на металлическом стержне диаметром  $5.5$  mm. Плоский анод был выполнен из латунной пластинки и соединен с корпусом камеры через шунт из 80 пленочных чип-резисторов величиной по  $3.3$   $\Omega$  (шунт № 1). Также использовались шунты № 2 и 3 из сопротивлений ТВО-0.25 (30 или 60 сопротивлений по  $3$   $\Omega$  соответственно). Расстояние между катодом и анодом варьировалось в пределах от 0 до 16 mm. За шунтами на расстоянии  $h = 10$  mm устанавливался коллектор с временным разрешением не хуже  $0.1$  ns. В центре шунта № 1 (анода) на его оси было сделано отверстие диаметром 1 mm, через которое ток пучка попадал на коллектор. В шунте № 3 на его оси было сделано отверстие диаметром 10 mm, которое закрывалось латунной сеткой с прозрачностью  $\sim 50\%$  и размером ячейки  $0.6 \times 0.6$  mm. Это отверстие также использовалось для подачи пучка электронов, формируемого в газовом диоде, на коллектор. Для уменьшения электромагнитных наводок между коллектором и шунтом устанавливалась Al фольга толщиной  $10$   $\mu$ m. Для определения времени прохождения пучка электронов между шунтом и коллектором перед шунтом устанавливалась дополнительная AlBe фольга толщиной  $45$   $\mu$ m, ток пучка при этом измерялся одновременно шунтом и коллектором. Точность синхронного запуска каналов осциллографа проверялась путем подачи двух исследуемых сигналов через тройник на один канал осциллографа. Благодаря данной системе регистрации удалось зарегистрировать время появления СЛЭП относительно импульса тока разряда с точностью  $\sim 50$  ps.

Генератор SM-3NS формировал в передающей линии с волновым сопротивлением  $50$   $\Omega$ , импульсом напряжения амплитудой  $\sim 150$  kV, длительностью  $1.4$  ns и временем нарастания на уровне  $0.1$ – $0.9$  не более  $0.25$  ns [13]. При использовании этого генератора с помощью емкостных делителей дополнительно регистрировались импульсы напряжения в передающей линии генератора, однако синхронизация импульсов тока разряда, пучка и напряжения не была предусмотрена.

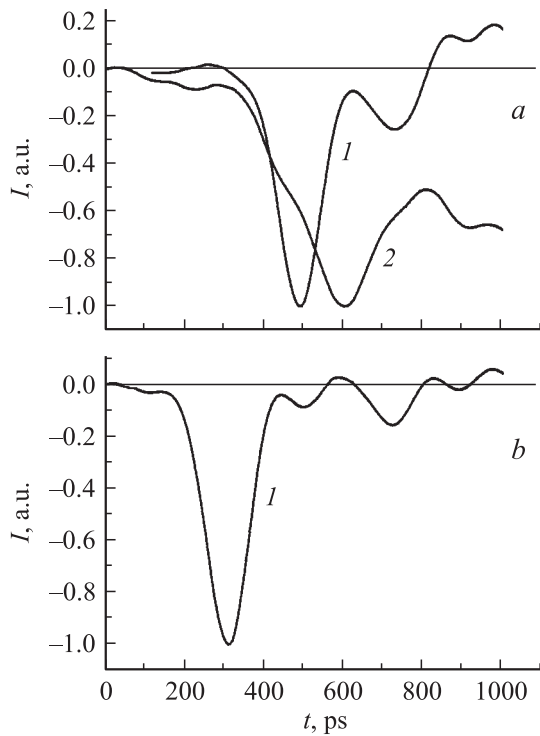
Для регистрации сигналов с токового шунта, емкостных делителей и коллектора применялся осциллограф TDS-6604 с полосой  $6$  GHz и  $20$  Gs/s. Свечение разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом.

3. Основные эксперименты были проведены при заполнении промежутка воздухом атмосферного давления. При подаче наносекундного импульса напряжения на газовый диод, как было показано ранее [1–4,6,8–11], формируются как объемный, так и контрагированный разряды. При больших промежутках (12–16 mm) разряд является объемным. Осциллограмма тока разряда для этих условий показана на рис. 2, *a* и 3, *a*. Фронт импульса тока до первого максимума  $I$  имеет три участка, в пределах которых скорость изменения тока  $dI/dt$  ( $I$  — величина тока,  $t$  — время) была разной. Первый участок соответствует току смещения через разрядный промежуток при подаче на него импульса напряжения (до развития ионизационных процессов в промежутке). Второй участок соответствует формированию плазмы в промежутке и зарядке конденсатора между фронтом плотной плазмы и анодом. Величина тока смещения при этом превышала 1 кА. Третий участок соответствовал разрядке емкости газового диода через промежуток, пик  $I$ . При уменьшении зазора (рис. 2, *b*) ток смещения до начала пробоя промежутка возрастал и исчезала четкая граница между вторым и третьим участками. За пиком  $I$  на осциллограмме тока разряда видны два основных максимума на импульсе тока разряда 2 и 3, которые имеют длительность около  $\sim 2$  ns (рис. 2). Через время  $\sim 8$  ns наблюдается положительный выброс на осциллограмме тока разряда, хотя разряд в этих условиях является объемным. Регистрация второго и третьего максимума обусловлена конструкцией генератора РАДАН-220 и газового диода, а также свойствами разрядного промежутка. Длительность импульса напряжения коаксиальной линии генератора РАДАН-220 составляет  $\sim 2$  ns, однако имеется индуктивность между линией генератора и газовым диодом. Наличие этой индуктивности и сравнительно большое сопротивление плазмы объемного разряда в первые наносекунды приводят к уменьшению тока разряда и к отражению части импульса напряжения от разрядного промежутка. Отраженный импульс проходит до противоположного конца высоковольтной линии генератора, отражается с тем же знаком и снова прикладывается к промежутку, заполненному газоразрядной плазмой. За счет этого на осциллограмме появляется третий максимум. Наличие подобного отражения в генераторах РАДАН-220 приводило при использовании вакуумных диодов к формированию двух импульсов тока электронного пучка [14].



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов тока разряда при межэлектродном промежутке 16 (a), 8 (b) и 0 (c) mm. Генератор РАДАН-220.

Амплитуда тока разряда зависит от межэлектродного зазора, сорта газа и его давления [6,10]. В воздухе атмосферного давления при промежутке 16 mm амплитуда второго и третьего максимумов составила  $\sim 3$  kA. При уменьшении зазора амплитуда второго и третьего максимумов тока увеличивалась (рис. 2, b). При коротком замыкании амплитуды второго и третьего пика были максимальными  $\sim 6$  kA (рис. 2, c). Так как емкость газового диода была зашунтирована, первый пик на осциллограмме тока разряда исчезал.



**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов СЛЭП (1) и тока разряда (2) при межэлектродном промежутке 14 мм, синхронизованные во времени (а). Генератор РАДАН-220. Ток разряда при максимальном разрешении регистрирующего тракта (б).

Одновременная регистрация тока пучка электронов коллектором и тока разряда шунтом показала, что второй участок на фронте осциллограммы тока разряда и фронт СЛЭП синхронизованы во времени. Импульс тока пучка возникает во время второго участка, а его максимум соответствует перегибу на осциллограмме тока разряда, который стабильно регистрировался при оптимальных для формирования СЛЭП условиях. Максимум тока пучка опережает первый пик на осциллограмме тока разряда на время  $\sim 100$  ps. Увеличение амплитуды первого пика тока разряда, как правило, приводит к увеличению

тока СЛЭП. На рис. 3, *a* приведены импульс тока разряда и импульс тока СЛЭП, синхронизированные во времени, а на рис. 3, *b* приведена осциллограмма тока СЛЭП, снятая при максимальном разрешении регистрирующего тракта. Амплитуда тока СЛЭП была более чем на порядок меньше тока разряда, регистрируемого в момент максимума СЛЭП. Отметим, что импульсы тока разряда, полученные при использовании генератора SM-3NS, также имели пик на фронте импульса тока, а на осциллограмме импульса напряжения, отраженного от разрядного промежутка в режимах с максимальной амплитудой тока СЛЭП, наблюдался провал. Сравнение различных шунтов показало, что наибольшую точность измерений дает применение пленочных чип-резисторов (шунт № 1).

4. На основании проведенных экспериментальных исследований можно дать следующее объяснение формы импульса тока разряда и тока пучка. При подаче на промежуток импульса напряжения с наносекундным фронтом плотная плазма образуется у катода. Граница плотной плазмы движется от катода к аноду, увеличивая емкость конденсатора, образованного границей плазмы и анодом. При достижении критического поля [3] формируется СЛЭП. Емкость конденсатора между плазмой и анодом, как показывают наши оценки, при малых расстояниях до анода достаточна для получения наблюдаемых токов смещения более одного килоампера. После достижения фронтом плазмы анода происходит разряд емкости газового диода через промежуток, что приводит к формированию первого пика на осциллограмме тока разряда. Далее ток разряда определяется проводимостью плазмы в промежутке и конструкцией генератора. Как видно из рис. 2, *a, b*, после первого пика ток разряда снова возрастает, что обусловлено разрядом коаксиальной линии генератора и емкости разрядника через индуктивность разрядника, соединительных трактов и газового диода, а также ростом проводимости плазмы в промежутке. Полученные осциллограммы подтверждают механизм формирования СЛЭП, который был предложен в [1].

5. Таким образом, в данной работе исследован пробой воздуха атмосферного давления в неоднородном электрическом поле. Определено время генерации сверхкороткого лавинного электронного пучка относительно импульса тока разряда. Показано, что СЛЭП при объемном разряде регистрируется на фронте импульса тока, а максимум тока СЛЭП достигается перед первым пиком тока на фронте тока разряда,

обусловленным разрядкой емкости газового диода через плазму. При этом СЛЭП при использовании генератора РАДАН-220 и изолятора от стандартной вакуумной рентгеновской трубки ИМА-350Д опережает первый пик на  $\sim 100$  ps. Зарегистрированы токи смещения с амплитудой более одного килоампера. Данные токи возникают за счет зарядки конденсатора, образованного плотной плазмой, фронт которой расширяется от катода, и плоским металлическим анодом.

Авторы благодарят В.Г. Шпака и С.Н. Рукина за предоставление генераторов РАДАН-220 и SM-3NS, а также И.В. Пегеля за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Программы „Фундаментальные проблемы нано- и пикосекундной электроники большой мощности“.

## Список литературы

- [1] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Известия вузов. Физика. 2003. № 3. С.94–95.
- [2] Репин П.Б., Репьев А.Г. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 7. С. 33–37.
- [3] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [4] Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. // Laser and Particle Beams. 2005. V. 23. N 4. P. 545–551.
- [5] Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 35–44.
- [6] Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 3. С. 64–69.
- [7] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 10. С. 7–13.
- [8] Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 8. С. 35–40.
- [9] Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 11. С. 1007–1010.
- [10] Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 6. С. 576–580.
- [11] Tarasenko V.F. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. N 8. P. 1501 (1–3).
- [12] Яландин М.И., Шпак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [13] Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Цыранов С.Н. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 5. С. 36–46.
- [14] Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Фомин Е.А., Шпак В.Г. // ПТЭ. 1987. № 4. С. 175–177.