

04;10

## Субнаносекундные пучки электронов, сформированные в газовом диоде

© В.Ф. Тарасенко, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин,  
В.М. Орловский, С.Б. Алексеев

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

Поступило в Редакцию 22 апреля 2003 г.

Исследованы условия формирования электронного пучка (пучка убегающих электронов) в воздухе при атмосферном давлении и субнаносекундном временном разрешении импульсов тока и напряжения. Впервые экспериментально показано, что электронный пучок возникает на фронте импульса напряжения при сравнительно малом напряжении на промежутке и имеет при атмосферном давлении воздуха длительность импульса тока на полувисоте не более 0.3 ns.

1. Использование высоковольтных импульсных генераторов с субнаносекундным фронтом для возбуждения разряда в гелии [1], а также в молекулярных газах (воздух, азот и смесь  $\text{CO}_2\text{--N}_2\text{--He}$ ) [2] позволяет существенно увеличить амплитуду электронного пучка (пучка убегающих электронов), сформированного в газовом диоде. В работах [1,2] также было показано, что электронный пучок амплитудой в десятки и сотни ампер формируется при малых средних значениях параметра  $E/p \sim 0.1 \text{ kV/cm} \cdot \text{Torr}$  ( $E$  — напряженность электрического поля,  $p$  — давление газа). Эти значения были существенно меньше критических для достижения эффекта „убегания электронов“ [3].

Ранее формирование пучков убегающих электронов и импульсов рентгеновского излучения в газонаполненных диодах исследовалось

многими научными группами (см. монографию [3] и обзор [4], а также ссылки в [1–4]). Однако в этих работах временное разрешение регистрирующей аппаратуры было не лучше 1 ns и не позволяло определить длительность электронного пучка и момент его появления при повышенных давлениях, что затрудняло понимание физических причин данного эффекта и выбор условий, при которых он наиболее заметен.

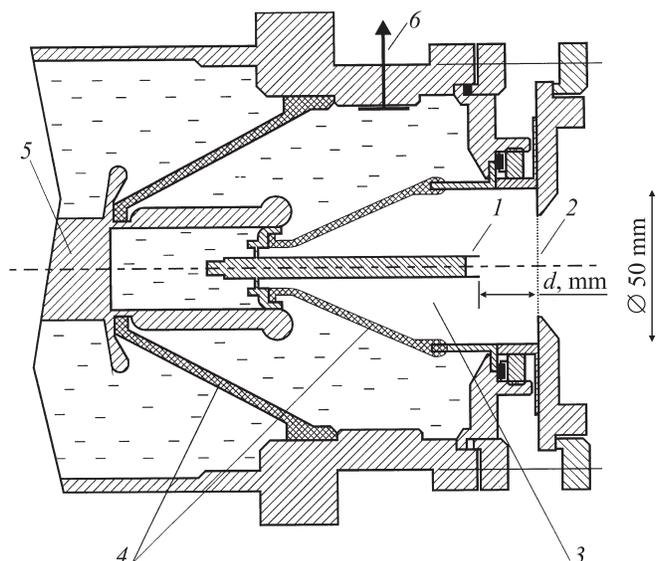
Целью данной работы было экспериментальное исследование формирования пучка убегающих электронов в диоде, заполненном воздухом до атмосферного давления, при малых средних значениях параметра  $E/p$  и субнаносекундном разрешении регистрирующей аппаратуры.

2. В экспериментах использовались два импульсных наносекундных генератора типа РАДАН [5,6]. Генератор РАДАН-303 [5] с выходным сопротивлением  $45 \Omega$  формировал на согласованной нагрузке импульсы напряжения от 50 до 170 kV. Длительность импульса напряжения на полувысоте составляла  $\sim 5$  ns, фронт  $\sim 1$  ns. В режиме холостого хода амплитуда напряжения могла достигать 340 kV. Генератор позволял плавно регулировать напряжение на газовом промежутке.

Другой генератор РАДАН-220 [6], имел выходное сопротивление  $20 \Omega$  и формировал на разрядном промежутке в режиме холостого хода импульс амплитудой до 220 kV, длительностью на полувысоте  $\sim 2$  ns при фронте  $\sim 0.3$  ns. Этот генератор использовался и ранее для получения электронного пучка в газовом диоде [2].

Конструкция газонаполненного диода и место расположения емкостного делителя показаны на рис. 1, при этом во всех случаях катод и изолятор газового диода были одинаковыми. Катодом служила трубка из стальной фольги толщиной  $50 \mu\text{m}$  и диаметром 6 mm. Расстояние между катодом и анодом устанавливалось в пределах 13–20 mm. Вывод электронного пучка осуществлялся через окно, в качестве которого использовалась AlBe фольга толщиной  $40 \mu\text{m}$ , Al фольга толщиной  $10 \mu\text{m}$  или сетка с прозрачностью 0.5. При использовании окна из сетки можно было визуально наблюдать разряд в газовом диоде.

Ток пучка измерялся с помощью коллектора, представляющего собой медный диск диаметром 49 mm, установленный на расстоянии 10 mm от фольги. Диск нагружался на коаксиальный кабель или одновременно на коаксиальный кабель и низкоомный шунт. В качестве коллектора пучка также использовались электроды малой площади, нагруженные на коаксиальный кабель; графитовый электрод, нагруженный



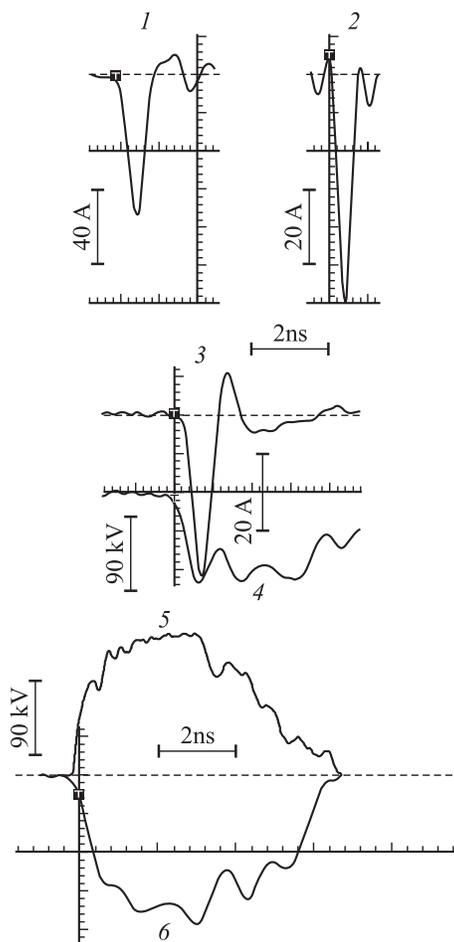
**Рис. 1.** Конструкция высоковольтного вывода генератора и газового диода: 1 — катод, 2 — фольга или сетка, 3 — газовый диод, 4 — изоляторы, 5 — потенциальный электрод генератора, 6 — емкостной делитель напряжения.

на полосковую линию, и классический цилиндр Фарадея. Конструкция цилиндра Фарадея позволяла откачивать форвакуумным насосом пространство между фольгой и измерительным электродом. Распределение электронов по энергиям определялось методом фольг. Для соединения измерительных электродов с осциллографом применялись широкополосные коаксиальные кабели и аттенюаторы 142-NM фирмы Barth Electronics с полосой пропускания 30 GHz (на уровне  $-3$  dB). Это позволяло регистрировать импульсы с длительностью фронта 0.1 ns. Тестирование тракта регистрации проводилось с помощью низковольтного генератора импульсов с фронтом до 70 ps и стробоскопического осциллографа TDS-820 с полосой пропускания 6 GHz. При фронте 100 ps амплитуда импульса напряжения уменьшалась не более чем на 20%, при фронте 400 ps потеря амплитуды не превышала 5%. Для регистрации сигналов с емкостного делителя и коллекторов электронного пучка использовался цифровой осциллограф TDS-684B (1 GHz, 5 Gs/s, т. е. 5 точек на 1 ns).

3. На обоих генераторах были проведены измерения тока пучка за фольгой или сеткой при различных зазорах анод–катод и изменении толщины фольги окна. Кроме того, генератор РАДАН-303 позволял регистрировать импульсы тока пучка и импульсы напряжения одновременно. Осциллограммы тока пучка электронов при максимальных амплитудах пучка представлены на рис. 2, там же приведены осциллограммы импульсов напряжения на промежутке и на согласованной нагрузке, полученные экспериментально и в результате расчета с помощью программы KARAT [7].

Видно, что длительность тока пучка на полувысоте не превышает  $\sim 0.4$  ns (осциллограммы 1, 3), а при малых размерах измерительного электрода уменьшается до  $\sim 0.3$  ns (осциллограмма 2), что является пределом разрешения осциллографа TDS-684B. Максимальные значения амплитуды тока за Al–Be фольгой толщиной  $40 \mu\text{m}$  составили  $\sim 75$  А для генератора РАДАН-220 (рис. 2, осциллограмма 1) и  $\sim 35$  А для генератора РАДАН-303 (рис. 2, осциллограмма 3). Если сравнить результаты, полученные на генераторе РАДАН-220, с результатами, описанными в [2], то можно отметить, что улучшение временного разрешения системы регистрации привело к увеличению амплитуды тока пучка и соответственному уменьшению длительности импульса тока, но произведение амплитуды тока на его длительность при этом практически не изменилось. Данные измерения дали те же зависимости для изменения амплитуды тока пучка убегающих электронов при вариации условий эксперимента, что и в [1,2]. Минимальная длительность импульса тока электронного пучка на полувысоте была зарегистрирована на уровне  $\sim 0.3$  ns (рис. 2, осциллограмма 2).

Данные измерения экспериментально показали, что электронный пучок возникает на фронте импульса напряжения и прекращается на плоской части импульса напряжения. При этом среднее значение параметра  $E/p$  на фронте импульса напряжения в момент появления пучка электронов в  $\sim 3$  раза меньше значения этого параметра во время окончания пучка электронов. Прекращение тока пучка при сохранении высокого напряжения на газовом диоде, по-видимому, связано с „перемыканием“ плазмой, распространяющейся от катода, промежутка анод–катод. При этом распределение поля в промежутке становится более равномерным и значения параметра  $E/p$ , достаточные для убегания электронов и вывода пучка за фольгу, не достигаются. Средняя энергия электронов в пучке, измеренная для генератора РАДАН-303,



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов тока пучка электронов (1–3) за AlBe фольгой при давлении воздуха в диоде одна атмосфера и импульсов напряжения на газовом диоде (4) и на согласованной нагрузке (5 — расчет, 6 — эксперимент). Масштаб времени по горизонтали 1 ns/клетку для осциллограмм (1–4) и 2 ns/клетку для (5, 6). Зазор в промежутке катод–анод 16 (1, 2) и 17 (3, 4) mm. Генератор 2 (получены осциллограммы 1, 2) и генератор 1 (3, 4, 6). Масштаб тока по времени 20 A/к (1), 10 A/к (2, 3) и масштаб напряжения по вертикали 45 kV/к (4–6).

при Al–Be фольге окна толщиной  $40\ \mu\text{m}$  составила  $\sim 60\ \text{keV}$ , что равняется  $\sim 60\%$  от максимального напряжения на промежутке. Полученные результаты подтверждают предположение о формировании пучка электронов в области между границей движущейся плазмы и анодом при достижении критического поля [2].

4. Таким образом, проведенные эксперименты по формированию электронного пучка в газовом диоде при атмосферном давлении воздуха и малых средних значениях параметра  $E/p$  с субнаносекундным временным разрешением показали, что электронный пучок возникает на фронте импульса напряжения с малой задержкой ( $\sim 0.5\ \text{ns}$ ) и имеет короткую длительность импульса на полувысоте ( $\sim 0.3\ \text{ns}$ ). Пучок убегающих электронов прекращается при высоких значениях параметра  $E/p$ , которые в несколько раз превышают значения  $E/p$  при появлении пучка электронов за фольгой, что обусловлено выравниванием распределения электрического поля в промежутке после его „перемыкания“ плазмой, распространяющейся от катода.

Формирование электронных пучков в газе при повышенных давлениях играет важную роль при импульсном пробое газовых промежутков и формировании объемных импульсных разрядов. Представляет интерес для изучения этого явления дальнейшее улучшение временного разрешения системы регистрации (до десятков пикосекунд) и изучение формирования пучков убегающих электронов в газах при более высоких давлениях (десятки атмосфер).

## Список литературы

- [1] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 16. С. 45–53.
- [2] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 10. С. 29–35.
- [3] Королев Ю.Л., Месяц Г.А. // Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [4] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. 1990. Т. 160. В. 7. С. 49–82.
- [5] Яландин М.И., Шпак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [6] Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146–149.
- [7] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Berkeley Research Associates, Inc., VA, USA, 1992.