

03;10;12

Сверхкороткий лавинный электронный пучок в азоте и гелии, генерируемый на плоской части импульса напряжения

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

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

Поступило в Редакцию 16 октября 2006 г.

Показано, что при малых напряжениях сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП) в азоте и гелии генерируется на плоской части импульса напряжения. При напряжении генератора 25 kV СЛЭП имеет длительность на полувывоте ~ 200 ps, а время его запаздывания относительно фронта импульса напряжения может составлять десятки наносекунд. Получены осциллограммы тока пучка с несколькими пиками субнаносекундной длительности. Установлено, что при повышенном давлении в газовом диоде напряжение на промежутке при генерации СЛЭП уменьшается на 10–20%.

PACS: 41.75.Fr

1. В [1] было показано, что при использовании наносекундного разряда в неоднородном электрическом поле за окном газовой камеры генерируется электронный пучок с длительностью на полувывоте не более 1.5 ns. Электронный пучок был получен как на переднем [1], так и на заднем фронте импульса напряжения [2] во время увеличения проводимости промежутка. Амплитуда тока пучка в [1] при заполнении газового диода воздухом атмосферного давления составила ~ 0.1 A (оценка на основе длительности импульса на полувывоте ~ 1.5 ns, и числа электронов в пучке $\sim 10^9$).

В работах, выполненных в последние годы (см. обзор [3], статьи [4–7] и ссылки в [3–7]), за фольгой при атмосферном давлении в газовых диодах были получены электронные пучки с амплитудой в единицы-сотни ампер, и было показано [4–7], что длительность импульса тока при атмосферном давлении различных газов составляет ~ 100 ps. Субнаносекундная длительность СЛЭП сохранялась также при изменении давления в широких пределах [7]. Однако в работах [1–7]

электронный пучок был получен при напряжении генератора более 100 kV и длительности переднего фронта импульса напряжения ~ 1 ns и менее, тогда как впервые рентгеновское излучение при разряде в гелии атмосферного давления было получено при напряжении генератора всего 17 kV [8]. Известны также работы [9,10], в которых для получения пучков электронов при сравнительно низких давлениях применялись напряжения в единицы-десятки киловольт и малые межэлектродные промежутки (< 1 mm).

Цель данной работы — исследовать возможность получения сверхкороткого лавинного электронного пучка в азоте и гелии при малом напряжении на промежутке (~ 25 kV) и определить в этих условиях время запаздывания генерации СЛЭП и его длительность.

2. При проведении работы применялись разрядная камера и импульсный генератор, который формировал импульсы напряжения на нагрузке без отражений [11]. Конструкция разрядной камеры приведена в работе [12]. Внутренний диаметр газового диода равнялся ~ 50 mm. 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 ~ 6 mm и толщиной $50 \mu\text{m}$. Плоский анод был выполнен из латунной пластинки и соединен с корпусом камеры через шунт из 60 пленочных чип-резисторов величиной по 3.2Ω или из двух металлических сеток с прозрачностью 64%, между которыми помещалась фольга из алюминия толщиной 3, $10 \mu\text{m}$ либо фольга толщиной $0.2 \mu\text{m}$, для увеличения механической прочности напыленная на пленку из кимфоля ($\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_3$) толщиной $2 \mu\text{m}$. Расстояние между катодом и анодом обычно составляло 12 mm. За анодом из сеток с фольгой на расстоянии $h = 9$ mm устанавливался коллектор с временным разрешением не хуже 0.1 ns. Эксперименты были проведены при заполнении газового диода гелием или азотом (1–760 Torr). Генератор формировал на катоде импульсы напряжения амплитудой 25 kV, длительностью ~ 90 ns и временем нарастания ~ 5 ns. Отраженные от газового диода импульсы поглощались в генераторе. Для регистрации сигналов с емкостного делителя и коллектора применялся осциллограф TDS-6604 с полосой 6 GHz при 20 Gs/s.

3. При подаче импульса напряжения амплитудой 25 kV и длительностью 90 ns на газовый диод с межэлектродным промежутком $d = 12$ mm в зависимости от давления и сорта газа формировались как объемный,

так и контрагированный разряды или пробой промежутка отсутствовал. Отметим, что стабильность пробоя промежутка ухудшалась как при увеличении давления в газовом диоде, так и при низких давлениях гелия и азота. При пробое промежутка регистрировались импульсы тока пучка, в том числе за фольгой. Характерные осциллограммы импульсов тока пучка, зарегистрированного за фольгой, и напряжения на промежутке в этих условиях приведены на рис. 1 и 2. Так как запаздывание пробоя промежутка обычно составляло более 5 ns, то на коротких развертках передний фронт импульса напряжения не был виден. При давлении гелия 150–760 Torr и азота 30–200 Torr регистрировался СЛЭП, для которого характерна субнаносекундная длительность (рис. 1). Основные отличия полученных импульсов от характеристик СЛЭП при напряжениях на промежутке в сотни киловольт [4–7] — это увеличение задержки до момента генерации СЛЭП и длительности импульса СЛЭП на полувисоте до ~ 200 ps. Также наблюдалось уменьшение амплитуды тока пучка. При напряжении на промежутке ~ 25 kV задержка времени формирования СЛЭП относительно фронта импульса напряжения могла достигать нескольких десятков ns. Напряжение на промежутке при генерации СЛЭП зависело от давления газа и при повышенных давлениях напряжение уменьшалось не более чем на 10–20% (рис. 1, а) (необходимо учесть, что на осциллограммах за счет разной задержки сигналов импульс тока запаздывает относительно импульса напряжения на ~ 350 ps). При уменьшении давления в газовом диоде напряжение на промежутке к моменту генерации СЛЭП уменьшалось более сильно и на осциллограмме напряжения начинали регистрироваться высокочастотные колебания (рис. 1, с). Отметим, что существенный спад напряжения на промежутке при его пробое регистрировался в широком диапазоне давлений, но длительность спада значительно превышала длительность СЛЭП. Таким образом, СЛЭП в данных условиях генерировался при больших временах запаздывания и без наличия существенного перепада на осциллограмме импульса напряжения во время генерации СЛЭП. Эти данные принципиально отличаются от результатов работы [5], полученных при фронте импульса напряжения ~ 2 ns. В [5] утверждалось, что для генерации пучка убегающих электронов обязательно нужен ступенчатый скачок с субнаносекундным перепадом напряжения.

При уменьшении давления (гелия < 150 Torr и азота < 30 Torr) форма импульса пучка электронов начинала изменяться (рис. 2).

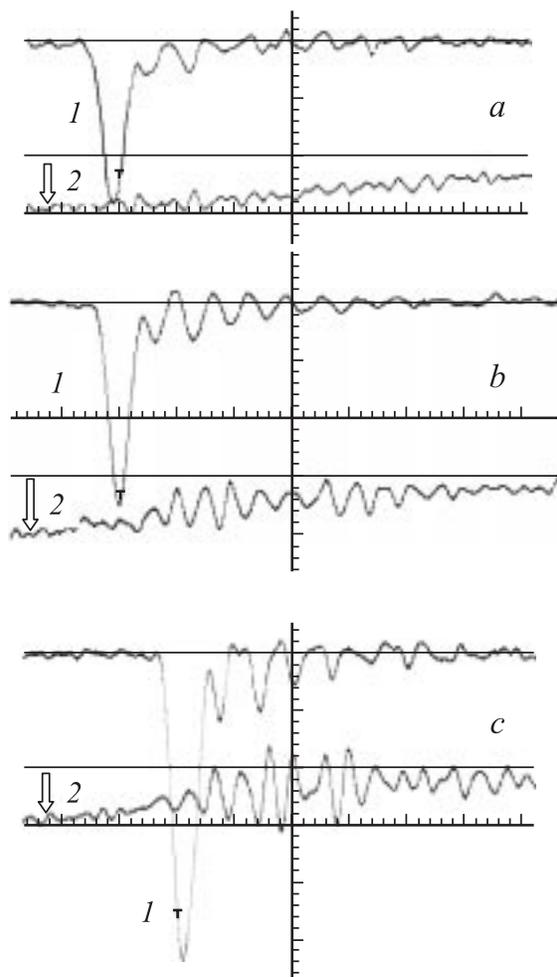


Рис. 1. Осциллограммы импульсов СЛЭП (I) и напряжения на промежутке (2). Задержка тока пучка относительно импульса напряжения ~ 0.35 ns. Давление гелия 736 (a) и 442 Torr (b), давление азота 59 Torr (c). Фольга из алюминия толщиной $0.2\ \mu\text{m}$, напыленная на пленку из кимфоля (a, c), и фольга из алюминия толщиной $3\ \mu\text{m}$ (b). Масштаб по горизонтали $0.5\ \text{ns/div}$, масштаб по вертикали для напряжения $25\ \text{kV/div}$, для тока пучка 0.008 (a, b) и $0.02\ \text{A/div}$ (c). Стрелками отмечен момент подачи напряжения.

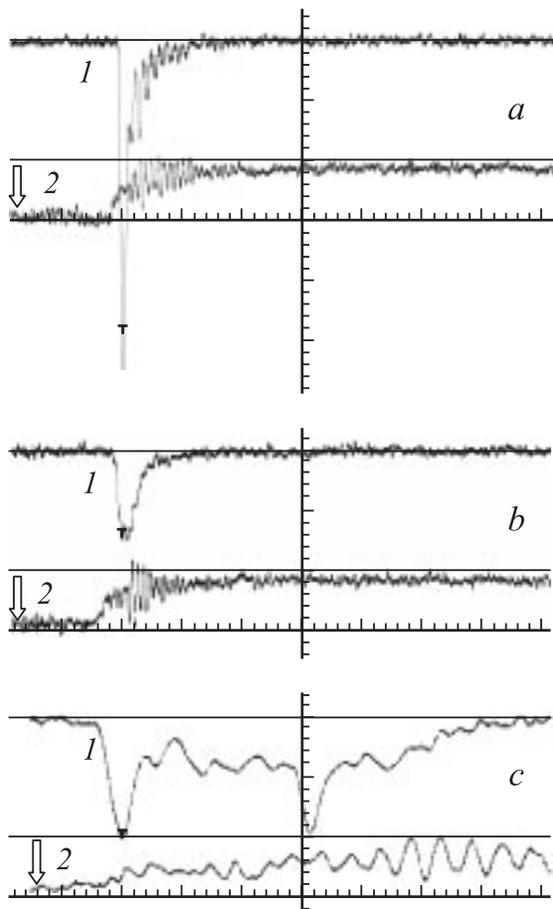


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока пучка (I) и напряжения на промежутке (2). Задержка тока пучка относительно импульса напряжения ~ 0.35 ns. Давление гелия 118 (a, b) и 88 Torr (c). Фольга из алюминия толщиной $0.2 \mu\text{m}$, напыленная на пленку из кимфоля. Масштаб по горизонтали 2.5 ns/div (a, b) и 0.5 ns/div (c), масштаб по вертикали для напряжения 25 kV/div , для тока пучка 0.02 (a, c) и 0.008 A/div (b).

Длительность импульса тока пучка возрастала, а также возрастала его амплитуда. В области давлений гелия ~ 100 Torr и азота ~ 5 Torr регистрировались импульсы тока пучка, имеющие несколько пиков. Так, например, на осциллограмме тока пучка (рис. 2, *с*) наблюдается пьедестал с длительностью по основанию несколько наносекунд, а на нем видны два отдельных пика, соответствующих по длительности на полувысоте СЛЭП. Основное отличие формирования пучков электронов в гелии от условий формирования в азоте — это более чем на порядок низкие давления азота для реализации подобных режимов генерации пучка электронов.

При дальнейшем уменьшении давления (гелия < 20 Torr и азота < 2 Torr) режим работы газового диода приближался к режиму при малых межэлектродных зазорах, описанному в работах [9,10]. В этих условиях амплитуда и длительность тока пучка возрастали, а короткие пики на токе пучка не регистрировались, т.е. при малых давлениях в газовом диоде режим генерации тока пучка не соответствовал режиму формирования СЛЭП.

4. На основании проведенных экспериментальных исследований можно дать следующее объяснение наблюдаемым режимам формирования пучка электронов в газовом диоде при напряжении на промежутке ~ 25 kV. При малых давлениях гелия и азота значение параметра $E/p = U/dp$ на всей длине промежутка или в большей его части достигало критического значения E_{cr} для формирования пучков убегающих электронов, где U — напряжение на промежутке, d — величина межэлектродного зазора, p — давление газа. Для определения значения E_{cr}/p мы использовали верхние ветви кривой Яковленко [13]. Соответственно при напряжении на промежутке, достаточном для достижения E_{cr}/p , и наличии эмиссии электронов из катода генерировался электронный пучок, длительность которого может составлять единицы-десятки наносекунд. Так, на рис. 2, *б* в переходном режиме длительность тока пучка составила ~ 3 ns и эта длительность увеличивалась при уменьшении давления. Отметим, что максимальные значения E/p при генерации пучка электронов в гелии, полученные в работе [9], также соответствовали верхней ветви кривой Яковленко.

При повышенных давлениях гелия (150–760 Torr) и азота (30–300 Torr) средние значения E/p были < 0.14 kV/(cm · Torr) для гелия и < 0.7 kV/(cm · Torr) для азота, что существенно ниже, чем необходимо для формирования пучков убегающих электронов в однородном

электрическом поле, см. [13]. За счет усиления электрического поля на макро- и микронеоднородностях катода критическое поле достигается только вблизи катода. В этих условиях формирование пучков субнаносекундной длительности можно объяснить только на основе предложенного в [14] механизма. Согласно этому механизму, СЛЭП формируется в прианодной области между фронтом волны ионизации, распространяющейся от катода к аноду, и анодом. При этом длительность импульса СЛЭП ограничена выравниванием электрического поля в промежутке после прихода на анод волны ионизации. Отметим, что генерация быстрых электронов у катода необходима при формировании СЛЭП для появления и распространения волны ионизации [3,15], а также для формирования объемного разряда. В [5] предполагалось, что „газовый пробой может быть фактором, только ограничивающим длительность инжектируемого пикосекундного пучка в газовом диоде“. Однако, как показывают измерения в данных условиях, напряжение на промежутке во время генерации пучка при повышенных давлениях существенно не изменяется, а пучок имеет субнаносекундную длительность.

Более того, в переходной области давлений может регистрироваться несколько субнаносекундных пиков на токе пучка. Наличие двух пиков на осциллограмме тока пучка (рис. 2, *с*) можно объяснить формированием двух волн ионизации с различной концентрацией плазмы в них. Приход каждой волны ионизации к аноду приводил к генерации СЛЭП. Две волны ионизации при разрядах в длинных трубках ранее наблюдались [15], причем вторая волна инициировалась за счет взрывной эмиссии электронов на катоде.

5. Таким образом, в данной работе показано, что сверхкороткий лавинный электронный пучок в азоте и гелии формируется при малых напряжениях генератора (~ 25 kV). СЛЭП генерируется на плоской части импульса напряжения при временах запаздывания в десятки наносекунд и имеет длительность на полувысоте ~ 200 ps. При малых давлениях гелия (~ 100 Torr) и азота (~ 20 Torr) на осциллограмме тока пучка регистрируется два пика с длительностью на полувысоте, которая соответствует длительности СЛЭП.

Авторы благодарят Д.И. Проскуровского и Г.Е. Озура за предоставление генератора.

Список литературы

- [1] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. В. 3. С. 564–568.
- [2] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. // ЖТФ. 1978. Т. 48. В. 8. С. 1617–1620.
- [3] Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. // Plasma Devices and Operations. 2005. V. 13. N 4. P. 231–279.
- [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] Tarasenko V.F. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. N 8. P. 1501(1–3).
- [7] Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 21. С. 69–75.
- [8] Frankel S., Highland V., Sloan T., Van Dyck, Wales W. // Nuclear Instruments and Methods. 1966. V. 44. P. 345–348.
- [9] Бохан П.А., Колбычев Г.В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 9. С. 1823–1831.
- [10] Сорокин А.П. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 10. С. 15–22.
- [11] Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [12] Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 6. С. 576–580.
- [13] Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. В. 5. С. 264–269.
- [14] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Известия ВУЗов. Физика. 2003. № 3. С. 94–95.
- [15] Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филигин И.В. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263–286.