

03;04;10

Эффективные режимы генерации пучков убегающих электронов в гелии, водороде и азоте

© В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, М.И. Ломаев,
Д.А. Сорокин, Ю.В. Шутько

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

Поступило в Редакцию 2 декабря 2009 г.

Исследованы вольт-амперные характеристики разряда и параметры пучка убегающих электронов при давлениях гелия, водорода, неона и азота единицы–сотни Торг. Показано, что наибольшие амплитуды сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) с длительностью импульса на полувывоте ~ 100 ps реализуются в гелии, водороде и азоте при давлениях ~ 60 , ~ 30 и ~ 10 Торг соответственно. Показано, что при увеличении давления гелия, водорода и азота от единиц до сотен Торг напряжение пробоя промежутка уменьшается, что приводит к снижению амплитуды СЛЭП. Показано, что при давлениях гелия 20–60 Торг, водорода 10–30 Торг и азота 3–10 Торг режим генерации пучка убегающих электронов изменяется и можно изменением давления в газовом диоде осуществлять плавную регулировку длительности импульса тока от ~ 100 до ~ 500 ps. Амплитуда тока пучка при этом увеличивается в 1.5–3 раза.

Генерация пучков убегающих электронов и импульсов рентгеновского излучения в газах повышенного давления представляет большой научный и практический интерес. Как показали ранее проведенные исследования наносекундных разрядов при высоких перенапряжениях на промежутке (см. [1–3] и ссылки в этих работах), электроны с повышенной энергией и рентгеновское излучение характерны для импульсных разрядов. Однако до настоящего времени нет единой точки зрения на механизм генерации пучков убегающих электронов в газах повышенного давления [1–8]. Не определена последовательность и взаимосвязь физических процессов, происходящих в разрядном промежутке и на катоде при генерации пучков убегающих электронов. С точки зрения практического использования пучков убегающих электронов

есть только первые сообщения о применении сверхкоротких лавинных электронных пучков (СЛЭП) в научном эксперименте [9,10]. Все это обусловлено короткими длительностями импульсов пучков убегающих электронов (рентгеновского излучения) и сложностью их регистрации, а также весьма малыми амплитудами тока пучка и рентгеновского излучения в неоптимальных режимах.

В работе [11] было показано, что в воздухе атмосферного давления с генераторами РАДАН-220 и СЛЭП-150 амплитуда тока пучка за фольгой газового диода составляет десятки ампер при длительности импульса на полувысоте ~ 100 ps. Дальнейшее увеличение амплитуды тока пучка возможно при использовании легких газов и при уменьшении их давления, впервые об этом сообщалось в [12]. Согласно данным работ [13–16], при уменьшении давления газа в промежутке режим генерации пучка убегающих электронов изменяется, а длительность импульса тока на полувысоте увеличивается. Однако этот переходный режим остается мало изученным, в частности, из-за сложности измерений импульсов напряжения на промежутке, тока разряда и тока пучка.

Цель настоящей работы — экспериментально исследовать условия генерации пучков убегающих электронов, при которых реализуются наибольшие амплитуды тока пучка, а длительность импульса на полувысоте не превышает ~ 100 ps, а также определить условия генерации в газовых диодах пучков электронов с длительностью 100–500 ps. В качестве исследуемых газов были выбраны гелий, водород, неон и азот. В этих газах ранее были получены наибольшие амплитуды тока пучка или число электронов за фольгой [12–14,16].

Эксперименты проводились с использованием газовых диодов, подобных описанным в работах [3,11,13–16], и двух импульсных генераторов. Газовые диоды имели внутренний диаметр металлического корпуса ~ 50 mm. Катодом служила трубка диаметром ~ 6 mm из стальной фольги толщиной $100 \mu\text{m}$. Вывод электронного пучка осуществлялся через анод, который был выполнен из фольги. За фольгой для ослабления тока пучка при его амплитудах более 40 А устанавливались сетки. Расстояние между анодом и катодом равнялось $d = 12$ mm. Генератор СЛЭП-150 (без передающей линии) формировал на высокоомной нагрузке импульсы напряжения амплитудой ~ 170 kV, амплитуда падающей волны в передающей линии составляла ~ 150 kV. Фронт импульса при этом составлял ~ 250 ps на уровне 0.1–0.9, а длительность импульса напряжения на полувысоте в случае согласованной нагрузки составляла ~ 1 ns. Применение передающей линии в генераторе СЛЭП-150

позволило регистрировать падающую и отраженную волны напряжения и восстановить напряжение на промежутке во время генерации тока пучка [3]. Генератор РАДАН-220 формировал импульсы напряжения с амплитудой ~ 250 kV, длительностью на полувысоте на согласованной нагрузке ~ 2 ns и временем нарастания ~ 0.5 ns. Ток пучка электронов измерялся с помощью коллектора (см. рис. 1 в [11]). Коллектор состоял из металлического конуса, образующего с корпусом линию с волновым сопротивлением 50Ω . Основание конуса, обращенное к фольге, имело диаметр 20 mm. В экспериментах с генератором СЛЭП-150 пучок электронов выводился через Al фольгу толщиной $15 \mu\text{m}$ и диафрагму диаметром 10 mm. В экспериментах с генератором РАДАН-220 СЛЭП выводился через AlMg-фольгу толщиной $50 \mu\text{m}$ и диаметром ~ 50 mm. Регистрируемый коллектором ток с обоими генераторами был меньше полного тока за фольгой. Определение амплитуды СЛЭП со всей поверхности газового диода является сложной задачей [3,11], которая в данной работе не ставилась. Для регистрации тока разряда применялся шунт, изготовленный из чип-резисторов [3]. Сигналы с коллектора, емкостных делителей и шунтов подавались на цифровой осциллограф DPO70604 (6 GHz, 25 GS \cdot s $^{-1}$). Подробнее методики измерений описаны в работе [3]. Было проведено исследование влияния на параметры СЛЭП давления p и сорта газа, а также напряжения на промежутке и тока разряда. Временное разрешение системы регистрации составляло ~ 0.1 ns.

На рис. 1 приведены зависимости амплитуды тока пучка и длительности импульса на полувысоте от давления гелия в газовом диоде. В гелии до давления ~ 60 Torr длительность импульса тока пучка составляет ~ 0.1 ns, что соответствует режиму генерации СЛЭП. Характер полученных зависимостей был одинаков для обоих генераторов. Наибольшая амплитуда тока пучка в гелии с генератором СЛЭП-150 в этом режиме составила ~ 60 A (через диафрагму диаметром 10 mm), а с генератором РАДАН-220 ~ 170 A (пучок, попадающий на приемную часть коллектора диаметром 20 mm). Увеличение амплитуды тока пучка с генератором РАДАН-220 обусловлено отсутствием диафрагмы диаметром 10 mm перед коллектором и большей амплитудой импульса напряжения.

Эксперименты с водородом, неоном и азотом были проведены с генератором РАДАН-220 при регистрации тока пучка на коллектор диаметром 20 mm. В водороде длительность импульса тока пучка соответствовала режиму генерации СЛЭП (длительность импульса на

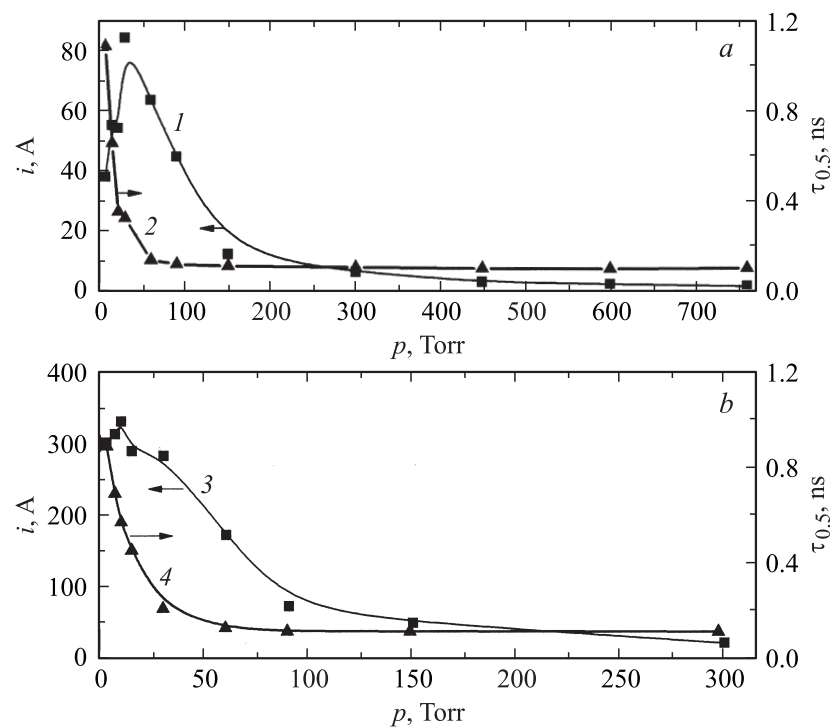


Рис. 1. Зависимости амплитуды (1, 3) и длительности на полувысоте (2, 4) импульса тока пучка от давления гелия: *a* — генератор СЛЭП-150, *b* — генератор РАДАН-220.

полувысоте ~ 0.1 ns) до давления ~ 30 Torr. Амплитуда тока СЛЭП в водороде при этом давлении составила ~ 140 А. В неоне режим генерации СЛЭП при малых давлениях был нестабильным из-за пробоя промежутка при малых напряжениях. В азоте длительность импульса тока пучка, соответствующая режиму генерации СЛЭП, сохранялась до давления ~ 10 Torr. Наибольшие амплитуды СЛЭП при этом составили ~ 60 А. Как мы уже отмечали, амплитуда СЛЭП со всей поверхности фольги для всех газов значительно больше приводимой выше, но из-за сложности ее измерения полная амплитуда СЛЭП за фольгой в данной работе не определялась. Следует отметить, что кроме оптимальных давления и сорта газа на амплитуду СЛЭП влияет ряд других факторов.

Ток пучка, в частности, зависит от длительности фронта импульса напряжения, амплитуды напряжения на промежутке и конструкции катода. В данных экспериментах мы зафиксировали межэлектродный зазор $d = 12 \text{ mm}$, конструкцию и материал катода, а также форму падающей на промежуток волны импульса напряжения.

На генераторе СЛЭП-150 при различных давлениях гелия была определена взаимосвязь между импульсом напряжения на промежутке и импульсом тока пучка. Осциллограммы импульсов напряжения на промежутке и тока СЛЭП, синхронизованные во времени для давлений гелия 30 и 60 Torr, приведены на рис. 2. На рис. 3 показаны зависимости амплитуды напряжения на промежутке и задержки между импульсом напряжения и импульсом тока пучка от давления гелия. Из анализа осциллограмм для давлений гелий 30 и 60 Torr (рис. 2), а также из осциллограмм напряжения, тока разряда и тока пучка, полученных в гелии, водороде, неоне и азоте для давлений от 7 до 760 Torr следует:

- С уменьшением давления гелия от 60 до 15 Torr длительность импульса напряжения и тока пучка возрастают. При этом амплитуда тока разряда во время генерации пучка электронов уменьшается. Подобное изменение тока пучка было зафиксировано в водороде при уменьшении p от 30 Torr и в азоте при уменьшении p от 10 Torr.
- В режиме СЛЭП скорость увеличения тока пучка за фольгой при одинаковом напряжении на промежутке существенно больше, чем в переходном режиме при более низком давлении (рис. 2).
- Амплитуда напряжений на промежутке при увеличении давления гелия от десятков Torr до 600 Torr уменьшается, что приводит к уменьшению амплитуды тока пучка.
- Быстрый спад напряжения на промежутке и уменьшение тока пучка за фольгой синхронны во времени.
- При давлениях гелия $< 150 \text{ Torr}$ задержка между фронтом импульса напряжения и фронтом тока пучка резко увеличивается.
- При низких давлениях гелия ($< 7 \text{ Torr}$) режим генерации тока пучка приближается к режиму вакуумного диода. При этом небольшие добавки гелия (единицы Torr) увеличивают амплитуду тока пучка по сравнению с амплитудой тока пучка при форвакууме.

Из полученных данных следует, что для получения наибольших амплитуд тока пучка в режиме СЛЭП с длительностью импульса $\sim 100 \text{ ps}$ следует использовать следующие газы и давления: гелий при $p \sim 60 \text{ Torr}$, водород при $p \sim 30 \text{ Torr}$ и азот при $p \sim 10 \text{ Torr}$. Оценки

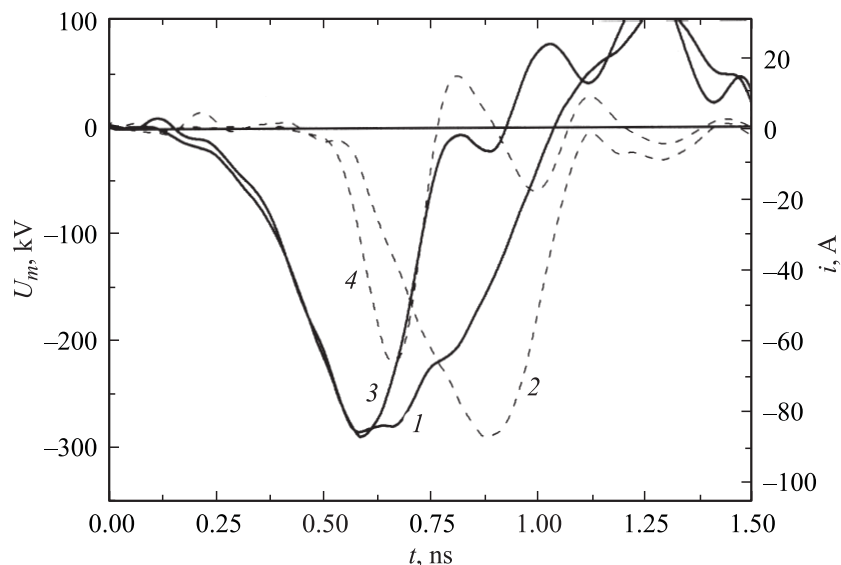


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на промежутке (1, 3) и тока пучка за фольгой (2, 4) при давлениях гелия 30 (1, 2) и 60 (3, 4) Торг. Генератор СЛЭП-150.

показывают, что при оптимизации всех параметров газового диода можно получать с используемыми генераторами при давлении гелия ~ 60 Торг амплитуду тока СЛЭП ~ 500 А. При уменьшении давления газов от величин, которые указаны выше, можно плавно управлять длительностью импульса тока пучка на полувысоте от ~ 100 до ~ 500 ps. При этом изменяется режим генерации тока пучка, и максимальные амплитуды достигают ~ 1 кА.

Полученные данные также позволяют уточнить механизм генерации СЛЭП, который подробно описан в [3]. Как видно из рис. 2, при переходе к режиму генерации СЛЭП скорость роста плотности тока dj/dt в газовом диоде увеличивается. В гелии при давлении 60 Торг на аноде (через отверстие в диафрагме диаметром 10 mm) dj/dt составляет $\sim 7 \cdot 10^{11}$ А/см² · с. При условии генерации всех убегающих электронов в прикатодной области и, если не учитывать размножение электронов в промежутке, увеличение dj/dt можно объяснить увеличением скорости движения убегающих электронов в плоскости анода. Однако, как видно

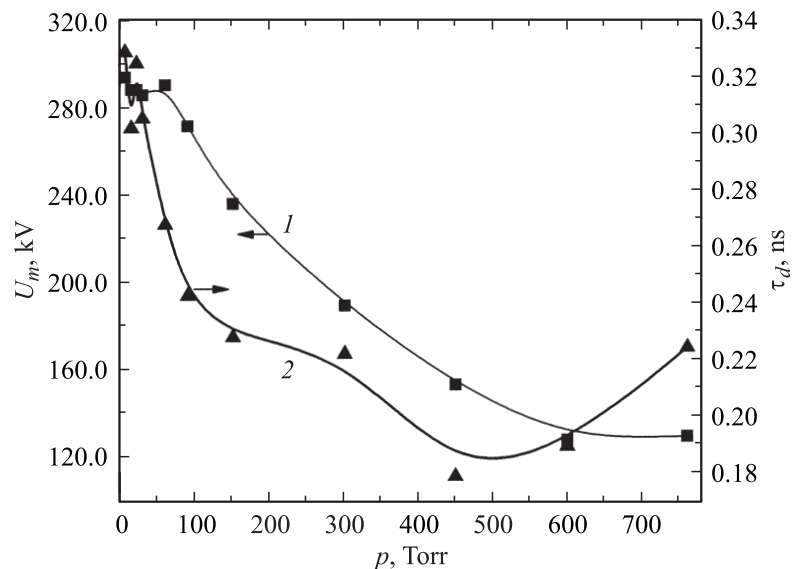


Рис. 3. Зависимости амплитуды импульса напряжения на промежутке (1) и задержки на уровне 0.1 между фронтом импульса напряжения и фронтом импульса тока пучка (2) от давления гелия. Генератор СЛЭП-150.

из рис. 2, при давлении 30 Torr амплитуда напряжения на промежутке не изменилась, а длительность импульса напряжения несколько увеличилась. Следовательно, нужно учитывать ионизационные процессы в промежутке, в частности формирование волны ионизации. Важность формирования волны ионизации для генерации СЛЭП подтверждают и эксперименты с подсветкой промежутка. Как было показано нами ранее [15], при предьонизации промежутка излучением поверхностного разряда и неизменном напряжении на промежутке СЛЭП за фольгой не регистрировался или его амплитуда уменьшалась на порядок и более. При предьонизации всего разрядного промежутка формирование волны ионизации затрудняется. Предполагаем, что число электронов в пучке растет при продвижении фронта волны ионизации к аноду.

Таким образом, проведенные исследования показали, что максимальные амплитуды тока пучка из газового диода достигаются при давлениях гелия и водорода в десятки Torr. С используемыми генераторами при давлении гелия ~ 60 Torr можно получать со всей поверхности фольги

амплитуду тока СЛЭП ~ 500 А. При изменении режима генерации тока пучка за счет уменьшения давления в гелии, водороде и азоте можно плавно управлять длительностью импульса тока пучка на полувывоте от ~ 100 до ~ 500 ps. При этом максимальные амплитуды тока пучка в гелии будут достигать ~ 1 кА.

Список литературы

- [1] *Babich L.P.* High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: ISTC Science and Technology Series. V. 2. Futurepast: Arlington, VA, 2003. 358 p.
- [2] Пучки убегающих электронов и разряды на основе волны размножения электронов фона в плотном газе / Отв. редактор С.И. Яковленко // Труды ИОФАН. М.: Наука, 2007. Т. 63. 186 с.
- [3] *Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V.* // Plasma Devices and Operation. 2008. V. 16. N 4. P. 267–298.
- [4] *Месяц Г.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85. В. 2. С. 119–122.
- [5] *Репин П.Б., Репьев А.Г.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 1. С. 78–85.
- [6] *Chararro J.E., Justis W., Krompholz H.G., Hatfield L.L., Neuber A.A.* // IEEE Trans. of Plasma Science. 2008. V. 36. N 5. P. 2505–2511.
- [7] *Карелин В.И., Тренькин А.А.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 9. С. 37–43.
- [8] *Мастюгин Д.С., Осипов В.В., Соломонов В.И.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 11. С. 10–17.
- [9] *Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. В. 11. С. 1059–1061.
- [10] *Липатов Е.И., Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Алексеев С.Б., Рыбка Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 6. С. 29–33.
- [11] *Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Рыбка Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 21. С. 79–87.
- [12] *Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* // ЖТФ. 1974. Т. 44. В. 3. С. 564–568.
- [13] *Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 12. С. 89–93.
- [14] *Бакиит Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 21. С. 69–75.
- [15] *Бакиит Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 1. С. 98–103.
- [16] *Бакиит Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 12. С. 29–34.