

УДК 537.52

**О РАСТАЛКИВАНИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПУЧКА**Д. В. Рыбка<sup>1</sup>, В. Ф. Тарасенко<sup>1</sup>, А. Н. Ткачев<sup>2</sup>, С. И. Яковленко<sup>2</sup>

*Приведены результаты, показывающие сложность регистрации амплитуды тока субнаносекундных электронных пучков. Установлено, что за счет расталкивания электронов поперечная скорость приводит к уходу части электронов за пределы коллектора.*

В последние годы снова возрос интерес к изучению формирования электронных пучков в газонаполненных диодах при наносекундных разрядах в неоднородном электрическом поле (см. обзоры [1–6] и литературу в них). Впервые электронный пучок при атмосферном давлении различных газов был получен за фольгой в работе [7]. Зарегистрированная длительность электронного пучка на полувывоте в [7] составила не более 1.5 нс. Улучшение методик регистрации электронных пучков и используемых осциллографов показало, что длительность сверхкороткого лавинного пучка электронов (СЛЭП) [8] составляет при атмосферном давлении различных газов  $\sim 0.1$  нс [6, 9–14] и что регистрируемая длительность тока СЛЭП на полувывоте ограничивается разрешением используемой аппаратуры. Также большие сложности возникают при измерении амплитуды СЛЭП, прежде всего из-за очень короткой длительности электронного пучка.

Цель данной работы – исследовать факторы, влияющие на регистрацию амплитуды СЛЭП коллектором.

Эксперименты были проведены с использованием газонаполненного диода и импульсного генератора РАДАН-220 [15]. Напряжение холостого хода генератора составляло около 220 кВ, а длительность переднего фронта импульса напряжения 0.5 нс. Импульс напряжения подавался на газонаполненный диод с катодом малого радиуса

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru.

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, E-mail: ant@kapella.gpi.ru.

кривизны. Конструкция газового диода была подобной используемой в [16]. Катод был выполнен из стальной трубки диаметром 6 мм с толщиной стенки 50 мкм, закрепленной на металлическом стержне такого же диаметра. Плоский анод, через который осуществлялся вывод электронного пучка, был образован AlBe фольгой толщиной  $\sim 45$  мкм. Расстояние между катодом и анодом изменялось от 8 до 16 мм. Эксперименты проводились при атмосферном давлении воздуха в диоде. Амплитудно-временные характеристики импульсов тока пучка регистрировались коллектором с временным разрешением  $\sim 0.1$  нс и шунтом на основе пленочных сопротивлений. Для измерения сигналов с коллектора и шунта использовался цифровой осциллограф TDS6604 (6 ГГц, 20 GS/s). Для соединения измерительных электродов с осциллографом применялись широкополосные коаксиальные кабели и аттенюаторы 142-NM фирмы Varth Electronics с полосой пропускания 30 ГГц. Разрешение всей системы регистрации с коллектором малого размера достигало  $\sim 0.05$  нс. Плотность тока СПЭП измерялась при выводе пучка электронов через фольгу и дополнительную диафрагму с отверстиями различного диаметра. Диафрагма из алюминиевой фольги толщиной 170 мкм устанавливалась сразу же за AlBe фольгой и пропускала через отверстие только часть тока пучка. При использовании диафрагмы с закрытым отверстием пучок электронов за фольгой и диафрагмой не регистрировался. Для измерения полной энергии пучка были попытки использовать калориметр ИМО-2Н. В работе [17] было показано, что для оценки амплитуды тока электронных пучков наносекундной длительности лучше всего использовать калориметрический метод. При этом калориметром ИМО-2Н измеряется полная энергия электронного пучка, а далее, используя данные измерений коллектором о длительности тока пучка на полувысоте и распределении электронов по энергиям, оценивается его амплитуда.

При подаче на газовый диод наносекундных импульсов напряжения на промежуток, заполненный воздухом атмосферного давления, за фольгой был получен электронный пучок, амплитуда которого измерялась различными методами. Наибольшую точность давали измерения с помощью коллектора при выводе пучка электронов через диафрагмы малого диаметра. Полный ток определялся из распределения плотности тока по поверхности фольги, полученного при перемещении диафрагмы с отверстием и коллектора. На рис. 1 приведена зависимость плотности тока пучка от диаметра отверстия в диафрагме. На зависимости есть два характерных участка. При малых диаметрах отверстия, когда регистрируемый ток пучка сравнительно мал, регистрируются наибольшие плотности тока пучка. В этих условиях напряжение на коллекторе наименьшее. На втором участке кривой, при диаметрах отверстия более 3 мм, наблюдается слабая за-

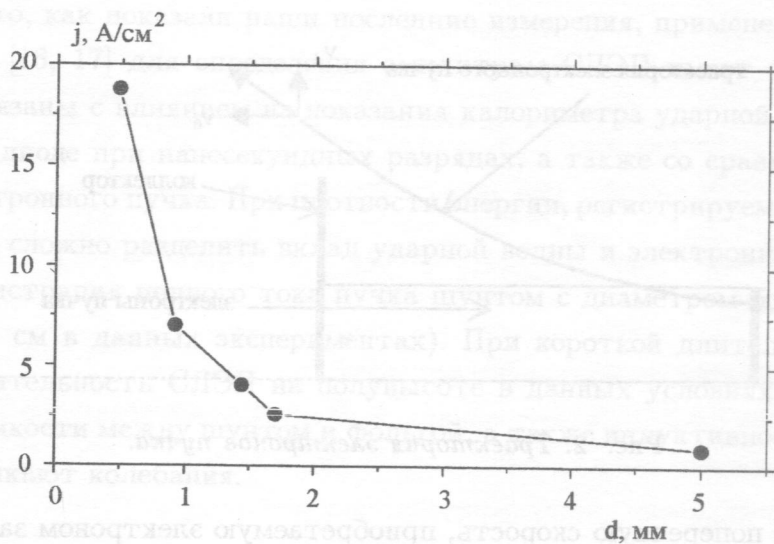


Рис. 1. Зависимость плотности тока СЛЭП от диаметра отверстия в дополнительной Al диафрагме. Пучок электронов выводится через AlBe фольгу толщиной 45 мкм, зазор между катодом и фольгой 12 мм.

Зависимость амплитуды тока пучка от диаметра отверстия. Данный результат можно, в частности, объяснить влиянием сопротивления плазмы, создаваемой пучком электронов между фольгой и коллектором. При больших отверстиях в диафрагме сопротивление плазмы уменьшается и может быть сравнимо или даже меньше, чем сопротивление кабеля, на который нагружен коаксиальный коллектор, соответственно, регистрируемая амплитуда СЛЭП меньше реальной. Однако при откачке пространства между коллектором и фольгой этот эффект оказывал малое влияние на измерения. Было установлено, что при использовании диафрагм с диаметром отверстия менее 3 мм откачка пространства между коллектором и фольгой приводит только к незначительному увеличению амплитуды тока пучка (до 20%). И только при больших размерах коллектора, малых расстояниях между фольгой и коллектором, а также анодом из тонкой фольги или сетки с большой прозрачностью, было зарегистрировано заметное влияние сопротивления плазмы. Объяснить уменьшение плотности тока пучка, наблюдаемое на рис. 1, можно уходом электронов за пределы коллектора в результате расталкивания электронов.

Расталкивание становится существенным, когда приобретаемая за счет расталкивания поперечная скорость приводит к уходу электрона за пределы коллектора (см. рис. 2).



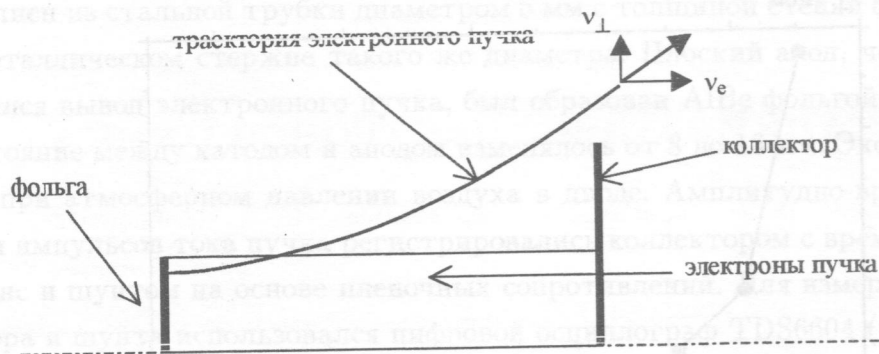


Рис. 2. Траектория электронов пучка.

Характерную поперечную скорость, приобретаемую электроном за счет его отталкивания от электронов, находящихся ближе к оси симметрии, можно оценить выражением [18]:

$$v_{\perp} = (4\pi N_e/m_e)^{1/2} e r.$$

Здесь  $N_e$  – плотность электронов в пучке;  $m_e$ ,  $e$  – масса и заряд электрона;  $r$  – расстояние электрона до оси симметрии.

Проведем некоторые оценки. При характерной энергии электрона пучка  $\epsilon_e \approx 100$  keV, его направленная вдоль оси симметрии скорость составляет величину  $v_e = (2\epsilon_e/m_e)^{1/2} \approx 2 \cdot 10^{10}$  см/с. При токе  $J \approx 100$  А и радиусе пучка  $r_0 \approx 2$  см имеем плотность тока  $j = J/(\pi r_0^2) \approx 8$  А/см<sup>2</sup> и плотность электронов в пучке  $N_e = j/e v_e \approx 3 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>. При этом  $v_{\perp} \approx 6 \cdot 10^9$  см/с для  $r = r_0$ . Следовательно, периферийный слой электронов разлетается под сравнительно большим углом  $\alpha$ , таким что  $\text{tg}(\alpha) \approx v_{\perp}/v_e \approx 0.3$  ( $\alpha \approx 17^\circ$ ). При коллимации пучка до величины  $r = 0.1 r_0$  имеем существенно меньший угол разлета:  $\text{tg}(\alpha) \approx 0.03$  ( $\alpha \approx 0.9^\circ$ ).

Таким образом, в данной работе приведены результаты, показывающие сложность регистрации амплитуды тока субнаносекундных электронных пучков. Показано, что за счет расталкивания электронов поперечная скорость приводит к уходу части электронов за пределы коллектора. Получены экспериментальные данные для пучка электронов длительностью на полувысоте не более 0.1 нс по влиянию на плотность тока пучка диаметра отверстия в диафрагме, через которое выводится из газового диода электронный пучок, и по влиянию сопротивления плазмы, создаваемой пучком электронов, между коллектором и фольгой. Зарегистрированы плотности тока СЛЭП в воздухе атмосферного давления в десятки А/см<sup>2</sup>.

Отметим, что, как показали наши последние измерения, применение калориметрического метода [16, 17] для определения амплитуды СЛЭП имеет ограничения. Эти ограничения связаны с влиянием на показания калориметра ударной волны, формируемой в газовом диоде при наносекундных разрядах, а также со сравнительно малыми энергиями электронного пучка. При плотности энергии, регистрируемой калориметром, до  $1.8 \text{ мДж/см}^2$  сложно разделить вклад ударной волны и электронного пучка. Также затруднена регистрация полного тока пучка шунтом с диаметром большим, чем диаметр фольги (5 см в данных экспериментах). При короткой длительности импульса тока пучка (длительность СЛЭП на полувысоте в данных условиях не более 100 пс) из-за влияния емкости между шунтом и фольгой, а также индуктивности шунта в цепи измерения возникают колебания.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Тарасенко В. Ф., Яковленко С. И. УФН **174**(9), 953 (2004).
- [2] Tkachev A. N., Yakovlenko S. I. Central European Journal of Physics (CEJP) **2**(4), 579 (2004). ([www.cesj.com/physics.html](http://www.cesj.com/physics.html))
- [3] Tarasenko V. F., Yakovlenko S. I. Physica scripta **72**(1), 41 (2005).
- [4] Tarasenko V. F., Yakovlenko S. I. Plasma Devices and Operations **13**(4), 231 (2005).
- [5] Yakovlenko S. I. Laser Physics **16**(3), 403 (2006).
- [6] Тарасенко В. Ф., Костыря И. Д. Изв. ВУЗов. Физика **48**(12), 40 (2005).
- [7] Тарасова Л. В., Худякова Л. Н., Лойко Т. В., Цукерман В. А. ЖТФ **44**(3), 564 (1974).
- [8] Тарасенко В. Ф., Орловский В. М., Шунайлов С. А. Известия ВУЗов. Физика **46**(3), 94 (2003).
- [9] Tarasenko V. F., Shpak V. G., Shunailov S. A., Kostyrya I. D. Laser and Particle Beams **23**(4), 545 (2005).
- [10] Андреев Ю. А., Костыря И. Д., Кошелев В. И., Тарасенко В. Ф. ЖТФ **76**(5), 105 (2006).
- [11] Месяц Г. А., Коровин С. Д., Шарыпов К. А. и др. Письма в ЖТФ **32**(1), 35 (2006).
- [12] Tarasenko V. F., Yakovlenko S. I., Shunailov S. A. et al. Laser Physics **16**(3), 526 (2006).
- [13] Tarasenko V. F. Appl. Phys. Lett. **88**(8), 1501(1-3) (2006).
- [14] Бакшт Е. Х., Рыбка Д. В., Ломаев М. И., Тарасенко В. Ф. Письма в ЖТФ **32**(21), 69 (2006).

- [15] Загулов Ф. Я., Котов А. С., Шпак В. Г., Юрике Я. Я., Ялаплин М. И. ПТЭ N 2, 146 (1989).
- [16] Тарасенко В. Ф., Костыря И. Д., Петин В. К., Шляхтун С. В. ЖТФ 76(12), 37 (2006).
- [17] Шпак В. Г. ПТЭ N 3, 165 (1980).
- [18] Ткачев А. Н., Яковлевско С. И. Квантовая электроника 20(11), 1117 (1993).

Институт общей физики  
им. А.М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 25 марта 2007 г.