

10

## Формирование импульсных сильноточных электронных пучков вне вакуумных условий

© Ю.Е. Коляда

Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

Поступило в Редакцию 30 ноября 1999 г.

В окончательной редакции 10 марта 2000 г.

Экспериментально продемонстрирована возможность формирования микросекундных пучков электронов в канале сильноточного дугового разряда плазменного ускорителя в атмосферных условиях.

Для решения ряда прикладных задач с использованием электронных пучков, таких как радиационная обработка, полимеризация, модификация поверхностных свойств материалов, возникает необходимость их выпуска в атмосферу. Это достигается путем разделения вакуумной камеры ускорителя и внешней среды тонкой металлической фольгой, применения сложной системы дифференциальной вакуумной откачки. Однако более перспективными для этих целей могут оказаться методы получения электронных пучков непосредственно в атмосферных условиях.

В [1–4] экспериментально исследовано формирование быстрых электронов и зарегистрировано рентгеновское излучение в начальной стадии развития искрового разряда в воздухе. Длительность импульсов пучков составила  $\sim 10$  ns при напряжениях kV. Возникновение пучков обусловлено эффектом убегания электронов [5,6]. Для нерелятивистского электрона это явление будет иметь место, если сила торможения меньше, чем сила электростатическая, вызванная действием внешнего ускоряющего поля. Сила торможения в этом случае обусловлена ионизационными потерями и описывается известной формулой Бете–Блоха:

$$F(\epsilon) = -\frac{n_0 e^4 Z}{8\pi \epsilon_0^2} \ln \frac{2\epsilon}{I}, \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $\epsilon$  — его кинетическая энергия,  $n_0$  — концентрация молекул газа,  $Z$  — атомный номер,  $I$  — средняя энергия неупругих

потерь,  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная. Величина критического поля  $E_c$  выше которого возникает ускорение (убегание электронов), определяются из выражения:

$$E_c = \frac{e^3 n_0 Z}{4\pi\varepsilon_0^2 2.72 \cdot I}. \quad (2)$$

Как следует из [6], соотношение (2) преобразуется к удобной для практических оценок формуле:

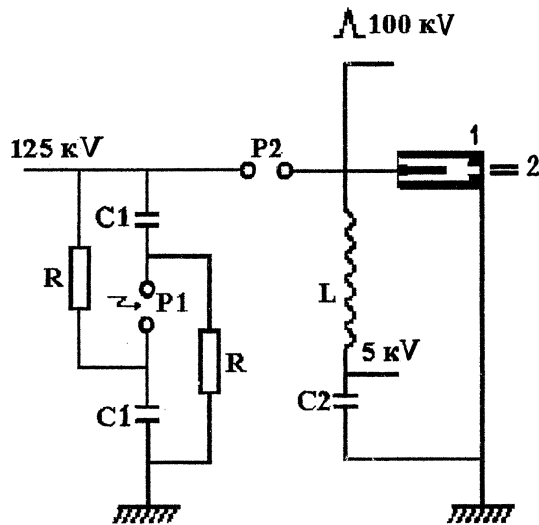
$$\frac{E_c}{P} = 3.88 \cdot 10^3 \frac{Z}{I}, \quad (3)$$

в которой величины  $E_c/P$  и  $I$  измеряются в  $V/cm \cdot Torr$  и  $eV$  соответственно для воздуха  $I$  можно принять равным 15–80  $eV$ .

В отличие от ранее полученных наносекундных пучков, в данной работе представлены результаты экспериментов по формированию микросекундных электронных пучков в канале сильноточного дугового разряда торцевого плазменного ускорителя, работающего в атмосферных условиях при воздействии дополнительного высоковольтного импульса.

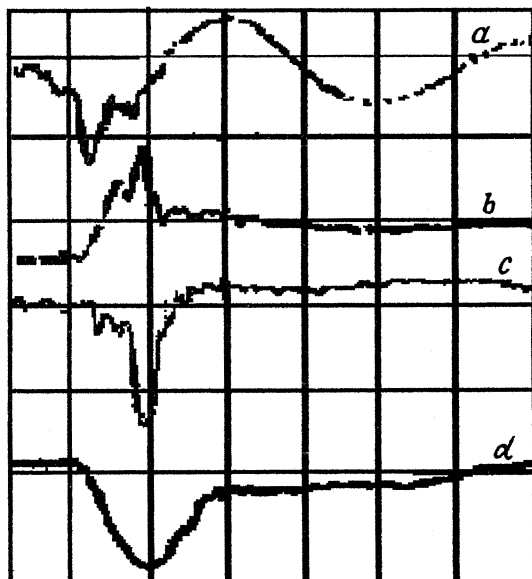
Схема эксперимента представлена на рис. 1. Плазменный ускоритель (ПУ) (правая часть рис. 1) выполнен из толстостенной ( $\sim 1$  см) диэлектрической трубы длиной 40 см с внутренним диаметром 8 мм и двумя электродами — стержневым и кольцевым. Расстояние между ними  $\sim 10$  см. Источником питания служил емкостный накопитель энергии  $C2 = 1.5 \cdot 10^{-3}$  F с рабочим напряжением 5 kV. Конструкция и работа аналогичного ускорителя подробно описана в [7]. Разряд между электродами инициировался высоковольтным ( $\sim 100$  kV) импульсом напряжения с длительностью по основанию  $\sim 5 \mu s$ . Индуктивность  $L = 0.3$  мН препятствовала прохождению запускающего импульса в цепь накопителя. После пробоя межэлектродного промежутка происходил мощный разряд емкостного накопителя с длительностью импульса  $\sim 1.4$  ms, при этом не менее 60% запасаемой энергии переходило в энергию плазменного сгустка.

Характерной особенностью работы такого ускорителя является то, что формирование мощного дугового разряда и инжекция плотного плазменного сгустка в окружающую среду обуславливают повышение давления в канале разряда до 100 ат, затем следует волна разрядки и давление в конце импульса понижается до величины значительно ниже атмосферного (может составлять величину 1–5 Torr). В этот момент



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — плазменный ускоритель, 2 — электронный пучок, емкостный накопитель, 5 kV — напряжение заряда накопителя,  $L$  — разделительная индуктивность,  $\Delta 100$  kV — высоковольтный импульс,  $C_1$ ,  $R$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  — элементы схемы генератора Маркса, 125 kV — напряжение заряда генератора.

времени к межэлектродному промежутку прикладывался отрицательный импульс высокого напряжения, формируемый двухступенчатым генератором Маркса (левая часть рис. 1). Параметры элементов схемы:  $C_1 = 0.64 \mu\text{F}$ ,  $R = 48 \text{ k}\Omega$ ,  $P_1$  — запускающий разрядник,  $P_2$  — разделительный. Заряд ступеней генератора осуществлялся напряжением 125 kV, а на нагрузке (межэлектродном промежутке ПУ) формировался импульс напряжения  $\leq 250 \text{ kV}$ . Индуктивность  $L$  при этом также препятствовала прохождению короткого импульса высокого напряжения в цепь накопителя  $C_2$ . Действие высоковольтного импульса на разрядный промежуток плазменного ускорителя, находящегося в этот момент времени при пониженном давлении, приводило к формированию электронного пучка. На осциллограммах рис. 2 приведены:  $a$  — ток в цепи разряда генератора Маркса (ток измерялся поясом Роговского);  $b$  — напряжение, приложенное к ускоряющему



**Рис. 2.** Результаты измерений: *a* — ток в цепи генератора Маркса; *b* — напряжение, приложенное к ускоряющему промежутку плазменного ускорителя; *c* — рентгеновское излучение; *d* — СВЧ излучение в диапазоне длин волн 10–3 см. Чувствительность лучей осциллографа: тока — 1 kA/div, напряжения — 125 kV/div, скорость развертки — 5 μs/div.

промежутку; *c* — рентгеновское излучение, регистрируемое кристаллом с фотоэлектронным множителем; *d* — и протектированный СВЧ сигнал, регистрируемый запредельной рупорной антенной в диапазоне длин волн 10–3 см. Скорость развертки осциллографов — 5 μs/div. Чувствительность лучей: тока — 1 kA/div, напряжения — 125 kV/div. Из анализа представленных осциллограмм вытекает факт формирования микросекундного электронного пучка с параметрами: током  $\sim 1$  kA, энергией  $\sim 200$  keV. Следует отметить, что формированию электронного пучка предшествует мощный дуговой разряд в канале ускорителя, разогревающий эмиттер — стержневой электрод до температуры плавления. Это обуславливает, по всей вероятности, возбуждение термоавтоэлектронной эмиссии.

Оценка величины отношения  $E_c/P$  по формуле (3) позволяет сделать вывод о возможности проявления эффекта убления электронов в условиях опыта. Так как в результате работы плазменного ускорителя давление в канале разряда понижается до величины  $\sim 1-5 \text{ Torr}$ , усредненная величина напряженности электрического поля  $\sim 20 \text{ V/cm}$ , то в условиях эксперимента  $E/p \sim (0.4 - 2) \cdot 10^4 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$ . Значения  $E_c/P$  для воздуха, рассчитанные по формуле (3), оказываются равными  $(0.8-3.5) \cdot 10^3 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$ , что значительно ниже значений, реализуемых в эксперименте.

Таким образом, в результате проведенных исследований продемонстрирована возможность формирования мощных микросекундных электронных пучков в канале сильноточного дугового разряда вне вакуумных условий.

В заключение считаю своим долгом выразить признательность Я.Б. Файнбергу за полезные и конструктивные обсуждения постановки и результатов эксперимента.

## Список литературы

- [1] Станкевич Ю.Л., Калинин Н.С. // ДАН СССР. 1967. Т. 177. № 1. С. 72–73.
- [2] Noggle R.C., Kriger E.P., Way Land I.R. // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. N 10. P. 4746–4748.
- [3] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. В. 2. С. 564–568.
- [4] Бохан П.А., Колбычев Г.В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 9. С. 1823–1831.
- [5] Гуревич А.В. // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. В. 5 (11). С. 1296–1301.
- [6] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [7] Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 264 с.