

04;12

Импульсный режим работы плазменного ускорителя малой мощности

© А.И. Бугрова, А.В. Десятков, Ю.В. Коробкин,
А.С. Липатов, В.К. Харчевников

Московский государственный институт радиотехники, электроники
и автоматики (технический университет) МИРЭА
E-mail: bugrova@mirea.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2010 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований интегральных и локальных характеристик лабораторной модели плазменного ускорителя малой мощности, работающей в импульсном режиме. Получены прямоугольные импульсы разрядного тока с длительностью переднего и заднего фронтов, не превышающих 1 ns. При вкладываемой средней мощности ~ 150 W величина тягового КПД составила 35%. С помощью электрических зондов измерены концентрация, электронная температура и потенциал пространства в выходящей плазменной струе. В процессе этих измерений обнаружено, что за срезом ускорителя распространяется хорошо сформированный плазменный поток с малым углом расходимости.

В настоящее время проявляется большой интерес к источникам плазмы мощностью, меньшей 200 W. Это приводит к необходимости создания источников малых размеров. Однако, как показывают многочисленные эксперименты, проведенные на различных стендах, имеется закономерная тенденция снижения коэффициента полезного действия с уменьшением калибра модели. Поэтому задача создания источника мощностью до 200 W с высоким КПД является актуальной.

В лаборатории МИРЭА разработана и испытана модель α -39 мощностью до 200 W, относящаяся к классу ускорителей АТОН, конструкция которых описана в [1]. В отличие от классического трехкатушечного источника плазмы [2] в моделях класса α реализуется такая же, как и в классическом, конфигурация силовых линий магнитного поля, но с помощью двух катушек намагничивания при наличии шести полюсов магнитопровода. Диаметр разрядной камеры ускорителя α -39 составляет 39 mm. Его габаритные размеры $L = 45$ mm, $D = 70$ mm.

Интегральные характеристики моделей такого типа, но больших размеров, работающих в стационарном режиме, приведены в [3]. Модель α -39 может работать как в стационарном, так и в импульсном режиме. Импульсный режим работы ускорителя зачастую имеет больший КПД, чем стационарный. Это связано с увеличением плотности рабочего вещества в течение импульса, но с меньшими тепловыми нагрузками и более экономным использованием рабочего газа.

Этот режим реализуется при импульсной работе электромагнитного клапана, стоящего в тракте подачи газа в ускоритель, и синхронизованном импульсном разрядном напряжении [4]. Радиотехническое устройство, управляющее клапаном и разрядным напряжением, позволило получить прямоугольные импульсы разрядного тока длительностью от 10 до 500 ns со скважностью Q от 3 до 10. Эксперименты показали, что с увеличением скважности форма импульса улучшается и становится более прямоугольной. При $Q = 10$ длительность переднего фронта составила величину 0.5 ns, заднего — 1 ns.

Измерение интегральных параметров модели проводилось при длительности импульса $\tau_p = 50$ ns и скважности $Q = 10$.

Тяга измерялась с помощью крутильных весов с лазерным указателем. При включении ускорителя в импульсном режиме платформа, на которой была установлена модель, начинала совершать колебания. Лазерный луч, отраженный от зеркала на платформе, также совершал колебательное движение на экране-шкале. Тяга, создаваемая одним прямоугольным импульсом, связана с параметрами колебательной системы весового устройства формулой

$$F_p = \frac{k \xi_m T_o}{2\pi \tau_p}, \quad (1)$$

где ξ_m — максимальное отклонение лазерного луча на экране, T_o — период колебаний крутильных весов, τ_p — длительность импульса разрядного тока, равная длительности импульса силы, k — тарировочный коэффициент.

Формула (1) получена из решения дифференциального уравнения колебаний трифилярного подвеса платформы крутильных весов при воздействии одиночного прямоугольного импульса силы. Среднее значение тяги равно

$$\langle F \rangle = \frac{F_p}{Q}. \quad (2)$$

Интегральные параметры модели α -39 в импульсном режиме ($\tau_p = 50$ ms, $Q = 10$)

\dot{m}_a , mg/s	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9
U_d , V	210	220	230	240	180	190	200	210	150	160	170	180
I_d , A	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.85	0.8	0.8	0.8
N_d , W	126	132	138	144	129	133	140	147	127	132	139	144
F , g	0.82	0.84	0.87	0.89	0.82	0.87	0.92	0.94	0.71	0.8	0.9	0.92
P_s , s	1170	1200	1240	1270	1020	1090	1150	1170	790	880	970	1020
η_a , %	37	37	38	38	32	34	36	36	21	25	29	31

Средняя мощность, потребляемая ускорителем, равна

$$\langle N_d \rangle = \langle I_d U_d \rangle, \quad (3)$$

где I_d — значение разрядного тока, U_d — напряжение разряда.

Измерение амплитуд разрядного тока и напряжения в одном импульсе проводилось с помощью осциллографа Tektronix TDS1012.

Анодный удельный импульс и коэффициент полезного действия вычислялись по формулам

$$P_s = \frac{\langle F \rangle}{\langle \dot{m}_a \rangle}, \quad (4)$$

$$\eta_a = \frac{\langle F \rangle^2}{2\langle \dot{m}_a \rangle \langle N_d \rangle}. \quad (5)$$

Результаты измерений средних значений интегральных параметров для трех расходов рабочего вещества ксенона $\langle \dot{m}_a \rangle = 0.7, 0.8$ и 0.9 mg/s приведены в таблице.

Локальные параметры плазмы в струе ускорителя α -39 измерялись для $\tau_p = 50$ ms и $Q = 10$: разрядное напряжение равнялось $U_d = 200$ V, средний массовый расход ксенона составлял $\dot{m}_a = 0.8$ mg/s. Для данного режима была проведена зондовая диагностика выходящей из ускорителя плазменной струи. Использовался электрический зонд, установленный на координатное устройство, позволяющее перемещать зонд в двух взаимно перпендикулярных направлениях (r, z). Ось z совпадает с осью плазменной струи. Это позволило в различных сечениях измерить

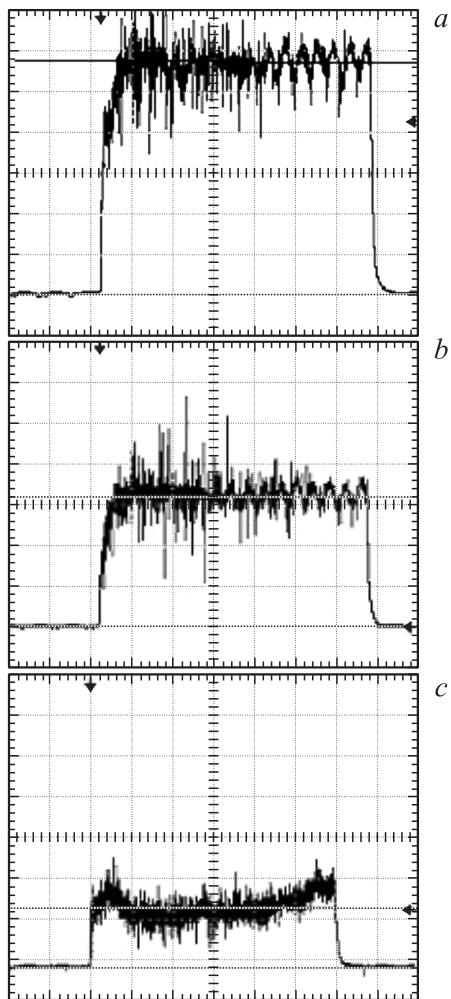


Рис. 1. Типичные осциллограммы ионной ветви ВАХ зонда для трех значений напряжения на зонде: a — 50 V, b — 30 V, c — 1 V.

зависимость от r потенциала пространства $\varphi(r)$, электронной температуры $T_e(r)$ и концентрации плазмы $n(r)$. Измерения проводились на расстояниях $z = 10, 20$ и 30 см от среза модели.

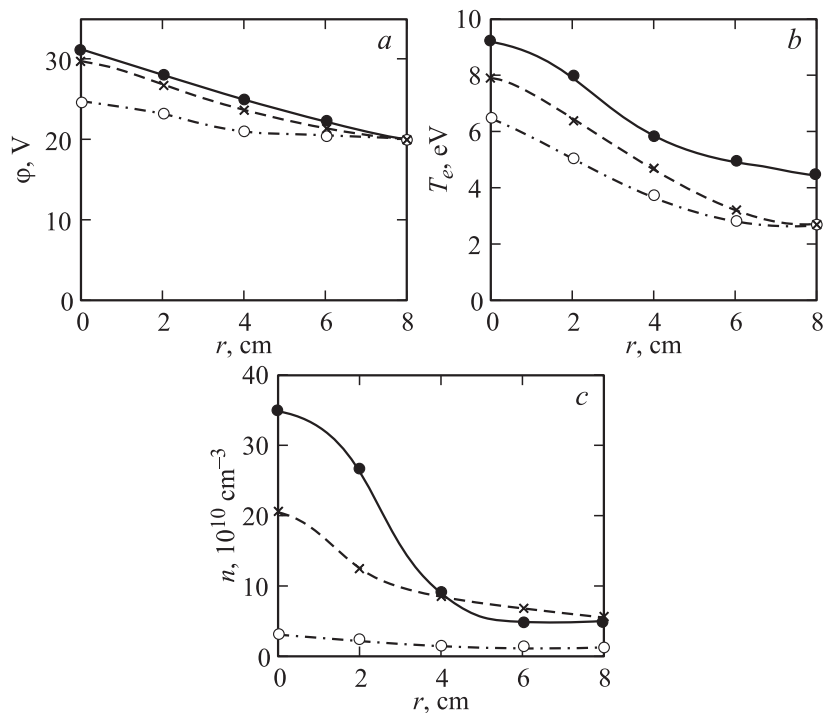


Рис. 2. Распределение локальных параметров струи: a — потенциала пространства, b — электронной температуры, c — концентрации. ● — $z = 10$ cm, x — $z = 20$ cm, ○ — $z = 30$ cm.

В каждой измеряемой точке в течение одного импульса фиксировалась осциллограмма тока на зонд как в ионной, так и в электронной ветвях ВАХ зонда. Типичные осциллограммы ионной ветви ВАХ при различных напряжениях, подаваемых на зонд, приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что в пространстве распространяется хорошо сформированный импульс плазмы с крутыми фронтами. Для определения интересующих параметров плазмы проводилась обработка всех осциллограмм. Определялся средний ток за один импульс (горизонтальная прямая на рис. 1) и восстанавливалась полная ВАХ зонда. Затем по стандартной методике рассчитывались ϕ , T_e и n . На рис. 2 приведены полученные

распределения локальных параметров плазмы по радиусу и длине струи источника. Видно, что по радиусу струи от ее центра к периферии происходит резкий спад φ , T_e и в особенности n . Также видно, что при удалении от среза ускорителя с $z = 10$ см до $z = 30$ см концентрация плазмы уменьшается практически на порядок. Полученные данные позволили определить полуугол расходимости, который оказался равен $\sim 15^\circ$.

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке Рособразования, проект № 2.1.1/473.

Список литературы

- [1] Бугрова А.И., Морозов А.И., Евтихийев Н.Н. и др. Плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов. Патент РФ № 2139647, 1999.
- [2] Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятсков А.В. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 7. С. 635–645.
- [3] Бугрова А.И., Десятсков А.В., Липатов А.С. и др. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 4. С. 395–400.
- [4] Бугров Г.Э., Десятсков А.В., Козинцева М.В., Липатов А.С. // Космонавтика и ракетостроение. 2008. Т. 3 (52). С. 69–74.