

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПЛАЗМЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В УСКОРИТЕЛЕ КПУ

А.М. Жукешов

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

Проведен расчет параметров плазмы в импульсном плазменном ускорителе на основе экспериментальных результатов, описывающих различные аспекты формирования и ускорения плазмы. Рассмотрено соответствие некоторых моделей расчетов экспериментальным данным, полученным на коаксиальном ускорителе КПУ-30.

Импульсные плазменные ускорители используются для получения высокотемпературных плазменных потоков большой мощности. Такие потоки находят широкое применение в науке и технологии. Особый интерес представляет использование горячих плазменных потоков для обработки материалов. С экспериментальной стороны работа этих ускорителей достаточно подробно исследована [1-3], однако, до сих пор не существует единой теоретической модели, описывающей все многообразие процессов в них. В связи с этим, необходимо сравнение полученных в последнее время экспериментальных данных на соответствие существующим теоретическим моделям, описывающим динамику формирования плазменных сгустков и процесса ускорения.

Знание проводимости газового разряда дает возможность определить важные параметры плазмы, такие как температура и концентрация.

Из осциллограмм напряжения и тока (рис.1) видно, что максимальный ток в разрядном контуре достигается при 6-7 мкс от начала разряда, при этом напряжение на контуре падает до величины порядка 1000 В.

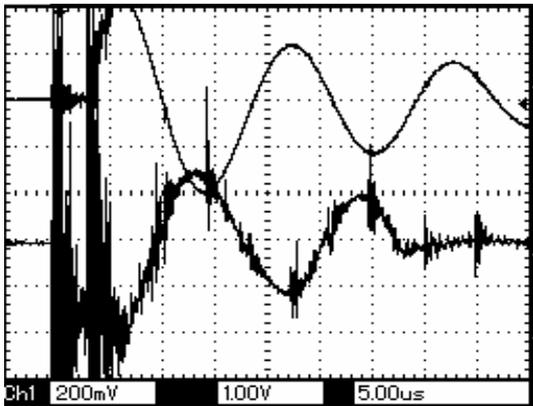


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения (внизу) ускорителя КПУ

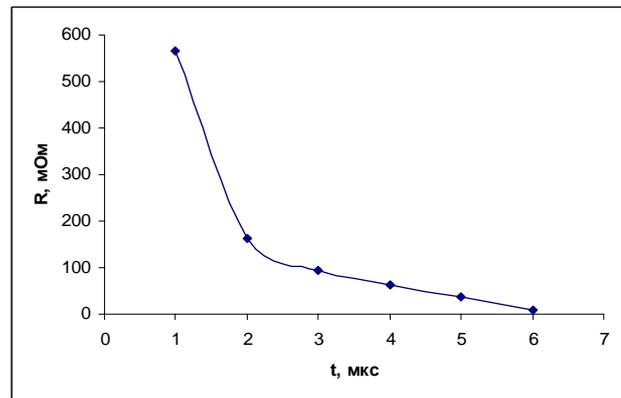


Рис. 2. Зависимость изменения сопротивления плазмы от времени

Это свидетельствует о том, что проводимость плазмы растет и в этот момент достигает максимума. Исходя из значений напряжения и тока как функций времени определялось полное сопротивление разряда. Ход кривой сопротивления плазмы показан на рис.2.

Зная разность потенциалов между электродами ускорителя, находим изменение напряженности электрического поля между электродами в зависимости от радиуса

$$E = \frac{U}{\ln \frac{a_2}{a_1}}, \quad (1)$$

где U - разность потенциалов между электродами, a_1 - радиус анода, a_2 - радиус катода.

Будем предполагать, что весь ток обусловлен движением электронной компоненты, так как для хорошо проводящей плазмы выполняется условие

$$\frac{I_e}{I_i} \sim \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{m}}, \quad (2)$$

где I_e – ток, обусловленный электронной компонентой, I_i - ток, обусловленный ионной компонентой, M - масса иона, m - масса электрона.

Уравнение непрерывности для электронной компоненты тока запишем в виде

$$I = 2\pi \cdot G E r d \quad (3)$$

(G -проводимость, d - толщина скин слоя). Толщина скин-слоя связана с проводимостью хорошо известным соотношением

$$d = \sqrt{\frac{t}{\pi \mu_0 G}}. \quad (4)$$

Совместно решая уравнения (3) и (4), получаем

$$G = \frac{I^2 \left(\ln \frac{a_2}{a_1} \right)^2 \mu_0}{4\pi U^2}. \quad (5)$$

Концентрация нейтрального газа в разрядной камере КПУ при давлении 0,1 Торр. составляет $n_0 = 3,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Далее оценим степень ионизации газа в плазменном потоке. Запишем уравнение изменения концентрации электронов

$$\frac{dn_e}{dt_i} = \frac{GE^2}{\varepsilon}, \quad N\varepsilon = \int_0^t U I dt. \quad (6)$$

Здесь N - число электронов в плазменной оболочке, ε - «цена электрона», величина порядка 100 эВ, тогда после подстановки численных значений в уравнение (6) получим $N = 3,3 \cdot 10^{18}$.

Предполагая, что плазма находится в токовом слое, имеющем форму диска с толщиной скин-слоя $d = 25$ см, рассчитаем концентрацию электронов в плазменной оболочке. Объем занимаемый плазмой $V = \pi d \cdot (R^2 - r^2) = 1400 \text{ см}^3$. Тогда концентрация $n_e = 2,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Тогда, степень ионизации составит около 63%. Таким образом, в данном случае мы имеем хорошо ионизованную плазму.

Температуру электронной компоненты можно определить по формуле Спитцера, приняв экспериментально полученную проводимость за проводимость полностью ионизованной плазмы

$$G = \frac{I^2 \left(\ln \frac{a_2}{a_1} \right)^2 \mu_0}{4\pi U^2} = \frac{\sqrt{2} \mu_0 T^{3/2}}{\pi^{3/2} m^{1/2} \Lambda} \quad (7)$$

К моменту достижения максимального тока 180 кА при напряжении 1,8 кВ имеем

$$T_e = (4 \pm 1) \text{ эВ.}$$

Это значение соответствует довольно горячей плазме, формируемой в канале ускорителя. Результаты расчетов показывают, что температура электронов практически постоянна при любом давлении в камере ускорителя. Этот результат вытекает из условия независимости температуры плазмы от плотности.

Литература

1. Marshall J., Henius I. //Nuclear Fusion. Suppl. 1960 P.449.
2. Плазменные ускорители. Под ред. Л.А.Арцимовича. Москва. Машиностроение. 1973, 312 с.
3. Физика и применение плазменных ускорителей. Минск, Наука и техника, 1974.

КПУ ҮДЕТКІШТЕГІ ПЛАЗМАНЫҢ ӨТКІЗІМДІЛІГІН МЕН ЭЛЕКТРОНДАРДЫҢ ТЕМПЕРАТУРАСЫН АНЫҚТАУ

Ә.М. Жүкешов

Импульстік үдеткіштердегі плазманың үдеу және қалыптасуының әртүрлі аспектілерін сипаттайтын эксперименттік негізінде плазма параметрлері есептелген. Кейбір есептеу модельдердің КПУ-30 коаксиалды үдеткішке сай келетіні анықталған.

THE CALCULATION OF ELECTRONS TEMPERATURE AND CONDUCTIVITY OF KPU ACCELERATOR

A.M. Zhukeshov

The account of plasma parameters in pulse guns is carried out on the basis of experimental describing various aspects of formation and acceleration of plasma. Some models to experimental data received on the coaxial accelerator KPU-30 are considered.