

04

Динамика формирования плазменного потока в импульсном ускорителе при постоянном давлении

© Ф.Б. Баимбетов, А.М. Жукешов, А.У. Амренова

Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Алматы, Казахстан
E-mail: Zhukeshov@physics.kz

Поступило в Редакцию 18 июля 2006 г.

Исследованы особенности формирования плазменного потока в импульсном коаксиальном ускорителе, определены температура и концентрация электронов в плазменном сгустке с применением зондовой методики.

PACS: 52.50.Dg

Импульсные плазменные ускорители используются для получения плотных плазменных сгустков в широком диапазоне энергий. Такие сгустки находят широкое применение в науке и технологии. Особый интерес представляет использование горячих плазменных сгустков для обработки материалов. Хорошо исследована работа этих ускорителей при импульсном напуске газа через быстрый клапан [1], однако режим с постоянным начальным давлением газа мало исследован. В связи с этим актуально исследование динамики формирования плазменных сгустков при постоянном давлении, так как этим определяется технологический эффект использования этого режима.

В данной работе исследована динамика формирования плазменных сгустков в импульсном коаксиальном ускорителе с применением электрических зондов. Как известно, основная идея зондовых измерений состоит в том, что поток частиц на зонд определяется наличием экранирующего слоя, толщина которого определяется потенциалом зонда [2]. При этом частицы на границу слоя попадают из окружающей зонд области плазмы, и это обстоятельство позволяет определять температуру. Для измерений в движущейся плазме применять электрические зонды возможно в случае, если направленная скорость плазмы гораздо меньше тепловой, чтобы успел образоваться экранирующий слой. Формируе-

мые в импульсных плазменных ускорителях потоки имеют скорости порядка 10^5 м/с, что соответствует тепловой температуре электронов порядка 0.1 eV. Температура плазмы обычно гораздо выше этого значения. Поэтому при таких скоростях потока температура электронов в плазме определяется не направленной скоростью, а максвелловским распределением, и для них зондовая теория, в принципе, применима. Что касается ионов, то для них направленная скорость выше тепловой скорости и применение классической зондовой теории может привести к большим погрешностям. Таким образом, для плазмы, формируемой в импульсном ускорителе, по зондовой характеристике, в принципе, можно определить только электронную температуру и концентрацию.

Эксперименты проводились на коаксиальном плазменном ускорителе (КПУ) [3]. Использовался режим работы ускорителя при постоянном давлении внутри разрядной камеры в диапазоне $(10^{-2}-1)$ Торг. Изменяя давление рабочего газа, мы можем регулировать плотность плазмы. В качестве рабочего газа использовался воздух. Установка состоит из рабочей камеры с коаксиальными электродами (диаметр анода 24 мм, диаметр катода 90 мм), батареи высоковольтных конденсаторов $70 \mu\text{F}$, вакуумного разрядника, системы зарядки и поджига, системы откачки и напуска газа, диагностических устройств. Длина электродов ускорителя составляет 60 см. Разрядное напряжение варьируется в диапазоне $U = (10-30)$ кV. Запасаемая энергия $W = (5-32)$ кJ. Амплитуда разрядного тока до 450 кA, продолжительность генерации потока $(7-28) \mu\text{s}$.

Электрический зонд представляет собой стальной стержень диаметром 0.5 и длиной 10 мм. Для минимизации импульсных помех источник напряжения для зонда был собран из 9-вольтовых аккумуляторов, соединенных последовательно. Сигнал с зонда регистрировался с помощью запоминающего осциллографа С8-14. Методика измерений состояла в том, чтобы при каждом импульсном разряде выполнялись одинаковые условия, за исключением одного изменяемого параметра. Таким образом, были исследованы зависимости зондового тока от напряжения на зонде, от напряжения разряда и от давления в камере.

Типичные сигналы при нулевом напряжении на зонде, а также при потенциале ± 50 V показаны на рис. 1. На осциллограммах наблюдаются в основном два пика противоположной полярности, амплитуда которых зависит от полярности напряжения на зонде. Амплитуда первого пика растет при увеличении положительного потенциала на зонде, а второго — отрицательного. Очевидно, такая реакция связана с ростом

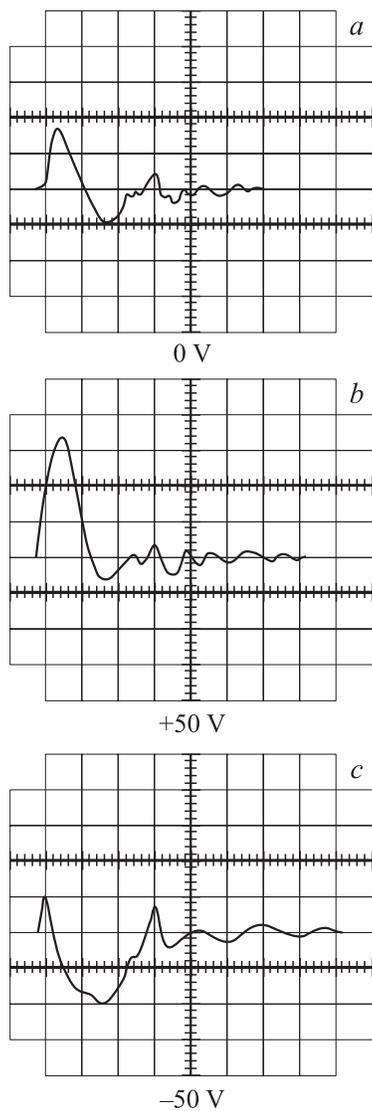


Рис. 1. Сигналы при различных потенциалах зонда. Развертка по горизонтали $5 \mu\text{s}/\text{div}$, по вертикали $10 \text{V}/\text{div}$.

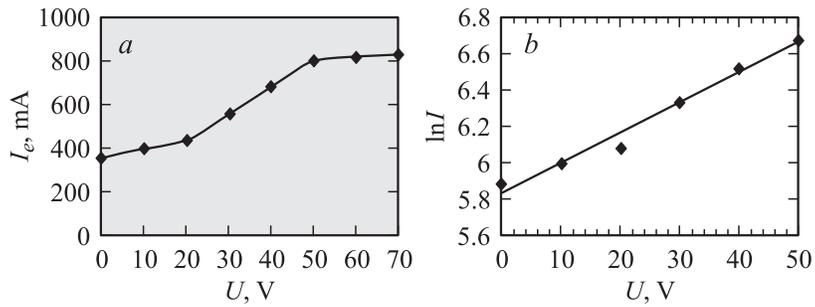


Рис. 2. ВАХ зонда.

электронного или ионного тока на зонд при соответствующей полярности. Из рис. 1 видно, что сигналы на зонд приходят не одновременно, а с разницей во времени $(6-8)\mu\text{s}$. Это может быть в случае, если через зонд последовательно проходят электронный и ионный сгустки, центр масс которых разделен в пространстве. Направленная скорость плазменного потока для ускорителя КПУ, определенная в [3] с применением магнитных зондов, составила $(2-10) \cdot 10^4$ m/s. Таким образом, при средней скорости $5 \cdot 10^4$ m/s расстояние между центрами масс сгустков составит 35 см, т.е. примерно половину длины электродов. По измерениям амплитуды сигналов электронного тока построена ВАХ зонда, показанная на рис. 2, *a*. Видно, что на начальном участке электронный ток достаточно хорошо описывается экспоненциальной зависимостью и достигает насыщения при 50 В. Зависимость логарифма тока от напряжения показана на рис. 2, *b*. Температура электронов, определенная из этой характеристики, составила (57 ± 5) eV. Средняя тепловая скорость для электронов при такой температуре составит $2 \cdot 10^6$ m/s, что на два порядка выше направленной. Концентрацию электронов определяли по известной формуле

$$n_e = \frac{I_{se}}{0.52S e v_e},$$

где I_{se} — электронный ток насыщения, S — площадь зонда, e — заряд электрона, v_e — средняя тепловая скорость электронов. Оценки показывают, что концентрация электронов составляет $1.5 \cdot 10^{11}$ cm $^{-3}$. Величина концентрации оказалась довольно низкой для плазменных

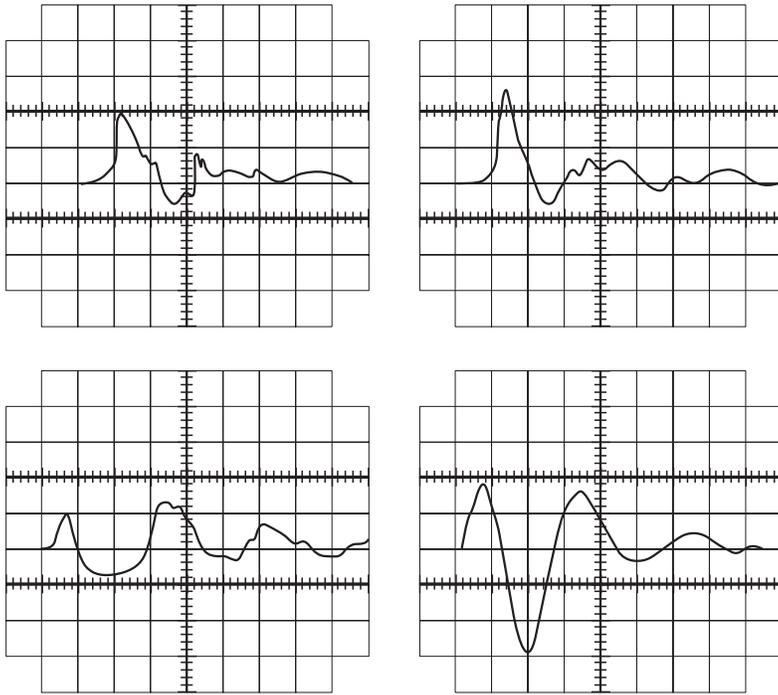


Рис. 3. Зондовые сигналы при давлении 0.1 (вверху) и 1 Торг (внизу). Развертка по горизонтали $5 \mu\text{s}/\text{div}$.

пушек, однако не следует забывать, что используется довольно низкое давление в камере около 0.05 Торг.

Каким же образом ведет себя сигнал с зонда при увеличении давления в камере? Установлено, что при увеличении давления примерно до 1 Торг сигнал с зонда изменяет свою форму: уменьшается площадь под кривой электронного тока и увеличивается под кривой ионного. Кроме этого, появляется второй электронный пик, который сравним с первым по амплитуде. Установлен также факт, что картина сложным образом зависит от напряжения разряда: если при низком давлении порядка 10^{-1} Торг увеличение напряжения разряда от 12 до 24 kV приводит к увеличению только электронной компоненты, то

при высоком давлении порядка 1 Торг возрастает также и ионная компонента. Обращает внимание, что ширина пика ионного тока значительно сужается, что свидетельствует об уменьшении разброса по скорости, т. е. получается моноэнергетический поток. Четыре типичные зондовые осциллограммы при 12 и 24 kV и разных давлениях показаны на рис. 3.

Таким образом, с применением зондовой методики установлены некоторые особенности формирования потока в импульсном плазменном ускорителе КПУ. Установлено, что поток состоит из электронной и ионной компонент, т. е. в данном случае реализуется так называемый „холловский“ режим ускорения [4]. Это позволяет, варьируя рабочее напряжение (напряжение разряда) и регулируя давление в рабочей камере, получать поток с преобладанием электронной или ионной компоненты, а также в некоторых пределах регулировать энергетическое распределение по скоростям в потоке. Данный эффект возможно использовать для целенаправленного воздействия на поверхность материалов. При давлениях более 0.1 Торг формируются два и более последовательных сгустка, причем количество электронов во втором сгустке может быть не меньше, чем в первом. Кроме этого, показано, что тепловая скорость электронов на два порядка выше направленной, т. е. электроны в сгустке имеют максвелловское распределение.

Список литературы

- [1] *Плазменные ускорители* / Под ред. Л.А. Арцимовича. М.: Машиностроение, 1973. 312 с.
- [2] *Диагностика плазмы* / Под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Ленарда. М.: Мир, 1967. С. 94. (Пер. с англ.: *Huddleston R.H., Leonard S.L. Plasma diagnostic techniques*. New York: Academic press, 1965).
- [3] *Баимбетов Ф.Б., Ибраев Б.М., Жукешов А.М., Амренова А.У.* // Изв. НАН РК. Сер. Физ.-матем. 2004. № 2. С. 93–97.
- [4] *Морозов А.И.* Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2006. Гл. 1. С. 79.