

Краткие сообщения

04

Исследование временных характеристик потока ионов из катодной области вакуумной дуги

© И.Л. Музюкин

Институт электрофизики УрО РАН,
620016 Екатеринбург, Россия
e-mail: im@ier.uran.ru

(Поступило в Редакцию 16 марта 2005 г.)

Проводились временные измерения потока ионов из области вакуумной дуги с использованием одноканального электростатического энергоанализатора, совмещенного с времяпролетным масс-анализатором. В результате выявлены следующие особенности ионного потока: ионный поток представляет собой последовательность интенсивных пучков, зарядовый состав потока сильно меняется от выброса к выбросу, наибольший всплеск соответствует окончанию действия дуги.

PACS: 41.75.-i

Введение

Основными характеристиками ионного потока из катодной области вакуумной дуги до сих пор считались форма и среднее значение энергетического распределения для разных зарядовых составляющих потока, а также соотношение общего тока ионов к току разряда. Работы [1,2] позволяют с высокой степенью уверенности утверждать, что общий вид распределений ионов и средние энергии хорошо известны для разных типов материалов.

Основные выводы, которые можно сделать из предыдущих работ следующие.

1. Существуют ионы, двигающиеся из области катодного пятна против электрического поля с энергиями, существенно превышающими падение напряжения на разряде.

2. Энергетическое распределение имеет колоколообразную форму, причем ширина распределения составляет десятки электрон-вольт. Распределения для различных зарядовых фракций различаются по среднему значению энергии, амплитуде и ширине, причем чаще всего наблюдается зависимость среднего значения энергии от заряда ионной фракции. На данный момент считается, что эти основные характеристики уже достаточно хорошо изучены.

Однако следует отметить, что все предыдущие исследования проделаны с большим временем измерения — порядка 5 ms [1,2]. Таким образом, быстрые процессы оказались неисследованными. Данное исследование представляет собой попытку определить временной характер ионного потока из катодной области вакуумной дуги.

Экспериментальная установка

Расположение электродов и схемы питания разряда представлена на рис. 1. Катод K представлял собой молибденовую пластину шириной 2 mm, анод A из проволоки диаметром 0.05 mm располагался над плоскостью катода и представлял собой полупетлю диаметром 1 mm. Поджигающий острый молибденовый электрод T подводился к поверхности катода к точке, находящейся под центром анодной полупетли. В качестве источника питания дуги использовалась длинная LC-линия (12 элементов, $L = 6 \mu\text{Hn}$, $C = 100 \text{ pF}$) (рис. 1). Линия формировала импульс напряжения длительностью $2 \mu\text{s}$. Заряд линии осуществлялся через со-

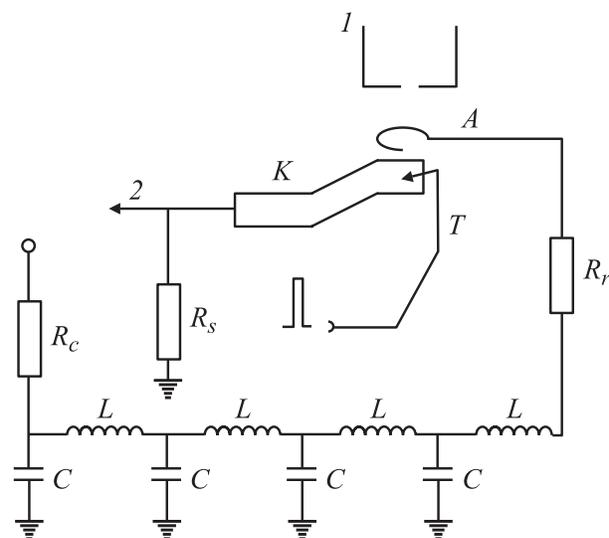


Рис. 1. Расположение электродов и схема питания дуги (I — анализатор, 2 — к осциллографу).

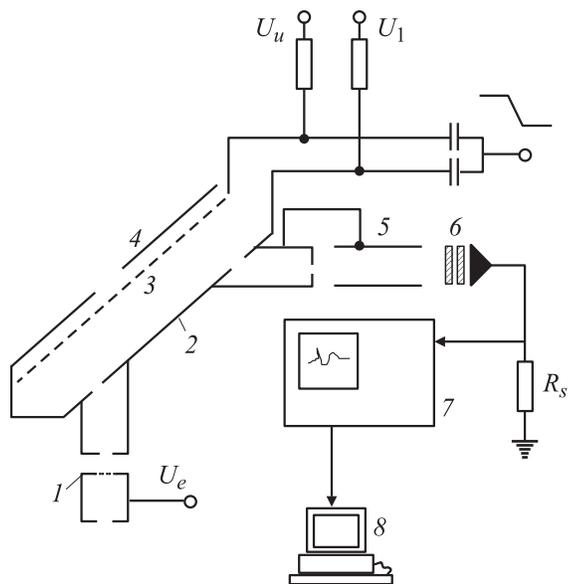


Рис. 2. Схема энергоанализатора.

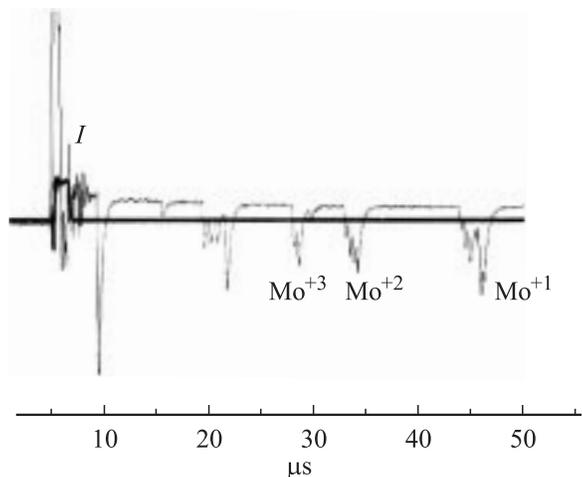


Рис. 3. Осциллограмма тока дуги и ионного потока $E/Z = 42 \text{ eV}$.

противление $R_c = 1 \text{ k}\Omega$. Дуга питалась через ограничительный резистор $R_r = 1 \Omega$. Длительность фронтов 300 ns . Дуга инициировалась поджигающим электродом, на который подавался импульс напряжения 20 kV длительностью 200 ns . Ток дуги составлял 30 A . Ток дуги измерялся шунтом $R_s = 0.1 \Omega$. Исследования проводились в вакууме 10^{-4} Pa . Откачка проводилась паромасленным насосом с азотной ловушкой.

Для исследований временного характера ионного потока использовался одноканальный энергоанализатор, совмещенный с времяпролетным масс-анализатором (рис. 2). Энергоанализатор состоит из входного узла 1, электростатического конденсатора с обкладками 2 и 3, коллектора частиц с высокими энергиями 4. Ионы через

входной узел 1 попадают в входную щель анализатора в нижней пластине. В выходную щель анализатора попадают только частицы со значением $E/Z = 1.4(U_u - U_1)$. Частицы с E/Z , отличным от значения настройки, либо попадают на нижнюю пластину 2, либо собираются коллектором 4. Пройдя выходную щель, ионы попадают в пролетную трубу 5 и детектор частиц 6. Сигнал с детектора частиц 6 записывается цифровым осциллографом 7 и в дальнейшем обрабатывается системой автоматического сбора и обработки сигналов на компьютере 8. Во время пролета от источника плазмы до детектора частицы разделяются по значениям M/Z . Таким образом, сигнал на выходе детектора частиц представлял собой последовательность сигналов от трехкратно, двукратно и однократно заряженных ионов (рис. 3). Калибровка системы по времени пролета производилась путем подачи кратковременного (200 ns) импульса тока. Сигнал с детектора представлял собой последовательность узких пиков, отмечающих время пролета каждой фракции в системе камера–конденсатор–пролетная труба. Время пролета частицы с массой M , энергией E и зарядом Z определяется соотношением $t = a\sqrt{ME/Z}$. Исходя из этого соотношения калибровочный параметр a выбирался так, чтобы начало сигнала любой ионной фракции совпадало или отставало от момента начала горения дуги. Эта процедура проводилась для каждого значения настройки анализатора E/Z . Временное разрешение системы регистрации $300\text{--}60 \text{ ns}$. Использовались два варианта детектора ионов с резистивной нагрузкой $R_s = 20$ и $5 \text{ k}\Omega$. В случае с большим сопротивлением сигнал ионного потока имел достаточно хорошую интенсивность, но плохие временные характеристики. В случае же с малым сопротивлением временное разрешение составило 60 ns , но уровень сигнала находился почти на уровне шумов. Режим быстрого детектора использовался в основном

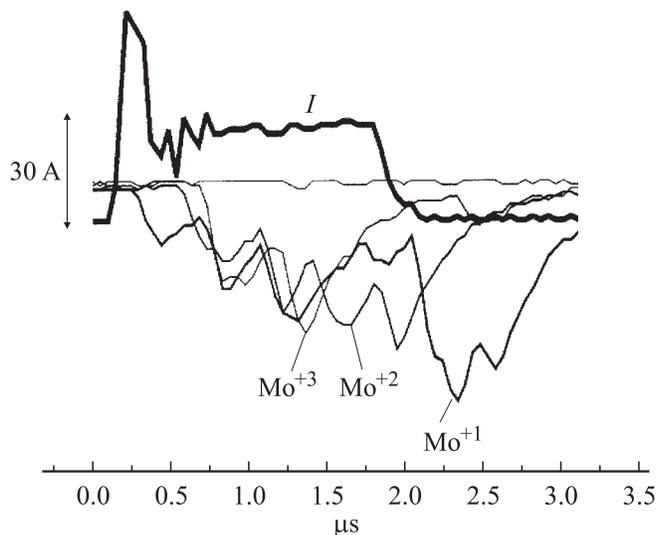


Рис. 4. Осциллограмма тока дуги и потока ионов при использовании медленной цепи регистрации.

для иллюстрации пикового характера потока ионов. Используя значения пролетного времени для каждой ионной фракции, можно сопоставить сигналы ионного потока с сигналом тока дуги. Типичное сопоставление сигналов ионного потока и тока дуги представлено на рис. 4. Измерения проводились для значения E/Z от 40 до 80 eV.

Результаты экспериментов

Типичная осциллограмма показана на рис. 4. Осциллограмма *a* получена с применением медленной системы регистрации, в результате чего пики ионного потока сливаются, формируя постоянный сигнал. На осциллограмме, полученной с помощью быстрой системы регистрации (рис. 5), явственно виден „пиковый“ характер потока ионов. При использовании быстрой системы регистрации видно отсутствие постоянного сигнала ионов. Такая картина наблюдается для разных значений E/Z . Следующей особенностью ионного потока можно считать непостоянство зарядового распределения ионного потока для энергии настройки — доли ионных фракций меняются от всплеска к всплеску. Это может говорить как об изменении зарядового состава плазмы, так и о неоднородном изменении энергетического распределения разных зарядовых фракций. Одной из важных особенностей ионного потока является наличие на многих осциллограммах мощного всплеска в конце импульса тока. Этот всплеск часто самый сильный среди всех во время горения дуги и состоит в основном из однозарядных ионов. Замечено также появление ионных всплесков после окончания действия импульса тока (рис. 4). Особенно отчетливо этот эффект проявляется на калибровочных импульсах (рис. 6). Сигнал ионного потока для разных фракций гораздо более продолжителен, чем токовый импульс.

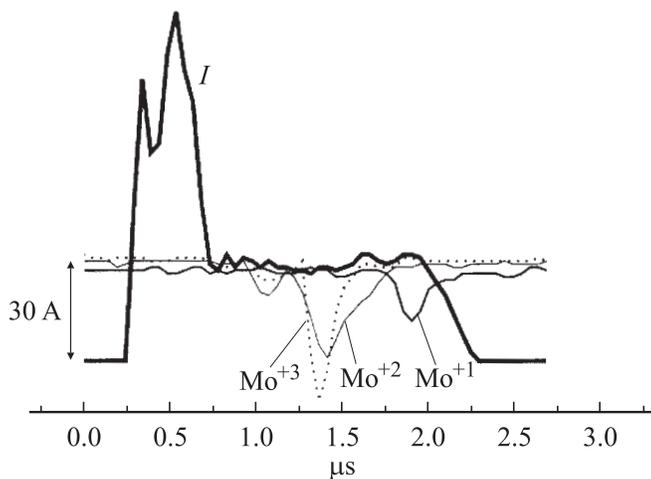


Рис. 5. Осциллограмма тока дуги и потока ионов при использовании скоростной цепи регистрации.

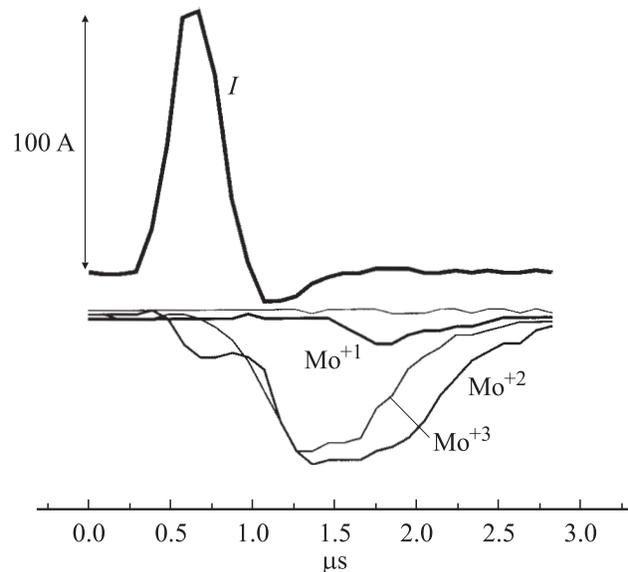


Рис. 6. Осциллограмма тока дуги и потока ионов при коротком импульсе тока.

Обсуждение результатов

Предыдущие временные исследования ионного потока в основном касались измерений общего тока ионов, исходящих из катодной области дуги. Эти исследования имели следующие недостатки. Так как ионный поток составляют ионы разных зарядов и энергий, то временное разрешение таких экспериментов определяется разностью времен пролета самых быстрых ионных фракций и самых медленных из точки ускорения до детектора частиц. При характерных размерах установки в несколько сантиметров временное разрешение не может быть лучше нескольких микросекунд. В таких измерениях невозможно выделить ионы разных фракций. В нашем случае при выделении только одной энергии возможно прямое сопоставление сигнала с детектора с временем ускорения ионов для разных зарядовых фракций. При этом временное разрешение определяется только характеристиками детектора ионов. Основным недостатком можно считать измерение только одной энергии ионов. Такое измерение не дает представления об измерении энергетического состава ионов во время горения дуги. Пиковый характер сигнала ионного катода, снимаемого с детектора ионов, можно было бы объяснить геометрическими особенностями расположения источника ионов и входного узла анализатора. Рваный характер потока может получаться по следующим причинам: 1) ионный поток может выбрасываться из катодной области в узком телесном угле и ионы могут попасть в анализатор только в случае попадания струи прямо во входной узел, 2) катодное пятно может уйти в тень за поджигающий электрод или боковую поверхность катода. Измеренные ранее [3] усредненные по времени угловые распределения интен-

сивности потока ионов не могут быть рассмотрены как опровержения гипотезы об ионных струях. Широкое угловое распределение может формироваться усреднением во времени разнонаправленных ионных струй. Но в данный момент не существует ни экспериментального подтверждения существования ионных струй, ни теоретических моделей, объясняющих их существование. Кроме того, калибровочные измерения показывают, что ионный поток попадает в анализатор даже при очень коротких (200 ns) импульсах тока, причем при каждом измерении присутствуют все основные фракции. Следовательно, можно утверждать, что пиковый характер потока ионов — характеристика самого дугового разряда.

Присутствие мощного выброса ионного потока при окончании горения разряда заметил еще Миллер [1]. В своей статье он указал на то, что этот выброс обычно даже более сильный, чем весь предыдущий сигнал потока. Наши исследования полностью подтверждают наличие такого выброса, причем наличие подавляющего количества однократно ионизованных ионов говорит о существенно измененном к этому времени ионизационном составе.

Калибровочные изменения, а также некоторые измерения с длинным импульсом свидетельствуют о наличии ускорения ионов уже после окончания действия импульса тока. Даже если во время калибровки была допущена ошибка и сигнал ионного потока смещен в сторону запаздывания, ширина сигнала потока для разных ионных фракций много больше, чем импульс тока для калибровочных измерений. Этот результат можно соотнести с мощным импульсом при окончании действия тока. Эти результаты ставят под сомнение гидродинамическое ускорения ионов в области высоких плотностей плазмы в катодном пятне. Ранее [2] была высказана гипотеза об ускорении ионов в области немонотонного распределения потенциала — „горба потенциала“. Необходимо при этом отметить наличие потока ускоренных электронов из области катодного пятна [4]. Средняя энергия электронов составляет 70–90 eV. Ускорение электронов не может быть объяснено ни гидродинамической моделью, ни „горбом потенциала“. С другой стороны, турбулентные процессы в плазме могут одновременно приводить к ускорению ионов и электронов. Кроме того, развитие плазменных турбулентностей приводит к уменьшению общей проводимости плазмы и, как следствие, к падению тока. Исследования [5,6] подтверждают корреляцию локальных падений тока и всплесков ионного потока. Все вместе эти экспериментальные факты делают плазменную турбулентность одним из вероятных механизмов ускорения ионов в вакуумной дуге.

Заключение

В результате исследований были выявлены следующие особенности потока ионов из вакуумной дуги: ионный поток состоит из последовательности интенсивных

выбросов, характерные времена следования импульсов составляют 200–500 ns; зарядовый состав меняется от выброса к выбросу; замечен сильный выброс малозарядных ионов на обрыве тока дуги; ионы могут ускоряться после окончания действия тока.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-02-17612 и 05-02-17650).

Список литературы

- [1] Miller H.G. // J. Appl. Phys. Vol. 43. N 5. May 1972.
- [2] Плотто А.А., Рыжков В.Н., Капин А.Т. // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. Вып. 8. С. 494–507.
- [3] Aksenov I.I., Khoroshikh V.M. // Proc. XVIII ISDEIV. Eindhoven, 1998. P. 211–214.
- [4] Ivanov V.A., Juttner B., Anders S. et al. On the Energy of Electrons and Ions of a Pulsed Metal Vapour Arc in Vacuum. 1980. P. 21–26.
- [5] Muzukin I.L., Mourzakaev A.M. // Abstracts of the XVIIIth ISDEIV. 1998. P. 306–309.
- [6] Smeets R. Low-current Behaviour and Current Chopping of Vacuum arcs ISBN. P. 66–73.