

Features of the sliding discharge on a boundary of dielectrics with different permittivities

V. K. Bashkin, G. P. Kuzmin, I. M. Minaev, A. A. Rukhadze
Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia

I. B. Timofeev

Physical Faculty of the Moscow University, Moscow, Russia

Consideration is made to a character of plasma action for a sliding discharge on a state and surface texture of dielectrics, when the discharge happens along a boundary of solid dielectrics with different permittivities, solid and fluid dielectrics, and solid and aeriform dielectrics.

УДК 537.525

Поток многозарядных ионов металлов из низковольтного вакуумного искрового разряда

С. П. Горбунов, В. И. Красов, В. Л. Паперный
Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Экспериментально был исследован поток ионов катодной струи низковольтной вакуумной искры с токами в диапазоне 1–10 кА. Показано, что в катодной струе присутствуют две ионные компоненты. Основную долю составляют медленные ионы, скорость которых при малых амплитудах разрядного тока близка к соответствующей величине в стационарных вакуумных дугах, скорость быстрых ионов в несколько раз выше скорости медленных. С ростом разрядного тока увеличиваются амплитуда сигналов обеих ионных компонент и их скорости. Быстрая ионная компонента соответствует пучкам многозарядных ионов, ранее обнаруженных авторами, их полное число в импульсе достигает 10^{13} при среднем заряде ионов меди $Z = +9$.

Вакуумные разряды широко используются как источники многозарядных ионов металлов для ионных ускорителей, для нанесения покрытий разных видов, обработки поверхностей и других прикладных задач [1]. Для этих применений необходимы данные о зарядовом составе и энергетическом спектре ионов плазмы катодной струи, а также о возможности управления параметрами плазмы в широком диапазоне величин. Параметры катодной струи хорошо известны для вакуумных дуг в диапазоне токов разряда несколько сотен ампер: скорость ионов составляет около 10^4 м/с, средний заряд лежит в диапазоне (+1÷+3), причем эти величины определяются только видом материала катода и практически не зависят от характеристик дуги [2, 3]. Вместе с тем еще в ранних экспериментах в высоковольтных искровых вакуумных разрядах регистрировались движущиеся к аноду пучки ускоренных многозарядных ионов материала катода (вплоть до Al^{+7} , W^{+7} и др.) с энергией, меняющейся в зависимости от напряжения разряда в диапазоне от десятков килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт [4, 5].

Эффект кратковременных выбросов ускоренных ионов материала катода в начальной стадии развития низковольтного искрового разряда обнаружен и изучался авторами в работах [6, 7]. Было показано, что средняя энергия быстрых ионов варьируется при изменении параметров разряда в широком диапазоне значений и достигает 20 кэВ при возрастании напряжения разряда до 1,5 кВ. В последующих измерениях было установлено, что и средний заряд пучков ускоренных ионов также зависит от параметров разряда и существенно превышает значения, наблюдаемые в вакуумной дуге, достигая, например, +9 для медного катода [8]. Было показано, что в данных экспериментальных условиях катодная струя содержит быструю и медленную ионные компоненты, причем скорость медленной компоненты также растет с увеличением напряжения накопителя и амплитуды разрядного тока [9]. В настоящей работе изучалось движение катодной плазменной струи в дрейфовом промежутке за анодом для установления связи между параметрами обеих ионных компонент и оценки полного числа многозарядных ионов в плазме катод-

ной струи в зависимости от характеристик разряда.

Экспериментальная установка и результаты

Эксперименты проводились в низкоиндуктивном ($L = 40$ нГ) вакуумном искровом разряде с напряжением накопителя U_d до 2,5 кВ [6—9]. Электродная система состояла из медного катода, расположенного на расстоянии 9 мм от заземленного анода в виде сетки с геометрической прозрачностью 60 %, и помещалась в вакуумный объем. Накопитель ($C = 2$ мкФ) заряжался до напряжения U_d , после чего на торце катода диаметром 1 мм инициировался разряд с помощью высоковольтного пробоя по поверхности диэлектрической вставки между катодом и поджигающим электродом. Ток разряда, амплитуда которого определялась величиной U_d , измерялся поясом Роговского непосредственно в цепи катода. Безмасляная откачка обеспечивала остаточное давление $(5-8) \cdot 10^{-6}$ Торр. Временное разрешение регистрирующей системы составляло около 40 нс.

Плазма генерировалась на торцевой поверхности катода и через сетчатый анод, находящийся под потенциалом заземленной вакуумной камеры, расширялась в дрейфовую трубку, длина которой составляла $L = 10, 35$ и 95 см. После прохождения трубки, выходной торец которой также закрывался сеткой, ионы регистрировались коллектором, находящимся под отрицательным относительно анода потенциалом, равным -200 В. Дополнительные измерения показали, что при этом смещении регистрируется ионный ток насыщения. Для запираания вторичных электронов, которые могут выбиваться ионами из коллектора, перед ним находилась сетка под потенциалом, равным -400 В относительно анода. Все используемые сетки имели геометрическую прозрачность около 60 %. Минимальное расстояние от коллектора до анода $L = 10$ см ограничивалось условием пробоя коллектора на сетку по плазменной струе.

Измерения дали следующие результаты. На рис. 1 приведены типичные осциллограммы разрядного тока и соответствующих сигналов коллектора при различных расстояниях от анода. Рис. 1, а показывает, что разряд носит осциллирующий характер с полупериодом, составляющим около 1 мкс, а также видно, что на расстояниях 10 и 35 см регистрируются две группы ионов. Первую группу, имеющую меньшую задержку относительно максимума разрядного тока, назовем "быстрыми", вторую — "медленными" ионами. Из рис. 1, б следует, что на малом расстоянии от анода сигналы, соответствующие обеим группам ионов, близки по амплитуде, при этом ширина пика первых в 2—5 раз меньше

ширины пика вторых. Отсюда следует, что суммарный заряд быстрых ионов, соответствующий площади пика, приблизительно во столько же раз меньше заряда медленных; длительность интервала генерации и начальная дисперсия скоростей быстрых ионов существенно меньше, чем эти величины для медленных ионов. С удалением коллектора от анода ширина обоих пиков возрастает (см. рис. 1, в, г), что обусловлено, очевидно, дисперсией начальных скоростей ионов. Амплитуды обеих ионных компонент падают, при этом амплитуда быстрой компоненты падает быстрее, так что при расстоянии коллектора от анода 95 см амплитуда приближается к порогу регистрации. Таким образом, относительная доля быстрой ионной компоненты в катодной струе уменьшается по мере движения плазмы в дрейфовом промежутке.

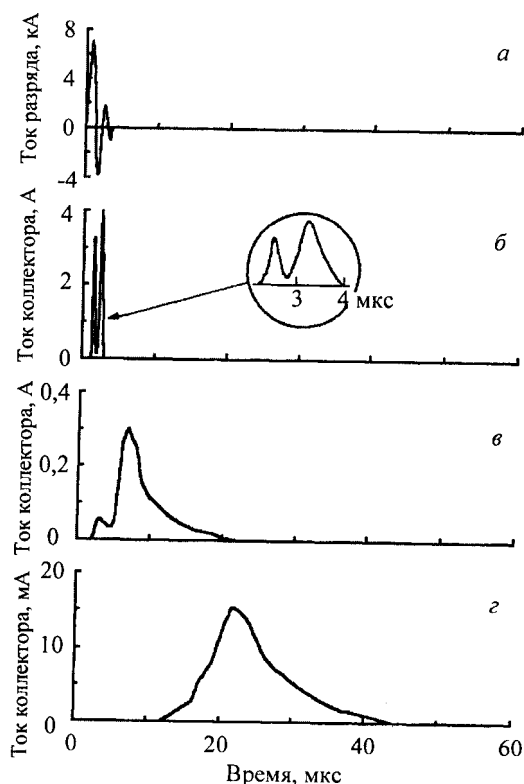


Рис. 1. Осциллограммы тока разряда (а) и соответствующих ионных сигналов с коллектора, расположенного на расстоянии от анода, равном 10 см (б), 35 см (в) и 95 см (г)

Из набора сигналов, подобных представленным на рис. 1, были вычислены средние скорости обеих ионных компонент при заданном напряжении накопителя и соответствующей амплитуде разрядного тока. Эта процедура в данном случае имела некоторые особенности, поэтому рассмотрим ее подробнее. Мы полагаем, что медленная компонента представляет основную часть ионного потока, и в соответствии с выводами эктонной модели генерации плазмы в вакуумном разряде [10] считаем, что поток ионов от катода пропорционален разрядному току.

Следовательно, максимальная плотность ионов катодной плазмы достигается в максимуме первого полупериода осцилляций разрядного тока, когда его амплитуда существенно превышает значения в последующие полупериоды. Измерения также показали, что ускорение ионов катодной струи происходит в межэлектродном промежутке, где замыкается разрядный ток, а в дрейфовой трубке происходит свободный разлет плазменной струи без заметного увеличения скорости ионов. Поэтому в последующих расчетах значения $L = 10, 35$ и 95 см были приняты в качестве длины траектории движения ионов с неизменной скоростью, полученной в межэлектродном промежутке, а задержка между максимумом сигнала на коллекторе, соответствующего медленному ионам, и первым максимумом разрядного тока была взята в качестве времени пролета ионами расстояния L . Из этих данных и оценивалась средняя скорость основной части ионов катодной струи. На рис. 1, б также видно, что при малой длине дрейфового промежутка задержка максимума сигнала оказывается сравнимой с длительностью разряда, т. е. с длительностью процесса образования ионов. Поэтому точность определения средней скорости основного ионного потока в этом случае оказывается недостаточной, и скорость рассчитывалась только для расстояний $L = 35$ и 90 см, где точность составляла 20 и 5 %, соответственно.

Далее мы предполагаем, что быстрая ионная компонента соответствует многозарядным ускоренным ионам, обнаруженным в работах [6, 7]. Там было показано, что эти ионы генерируются в виде кратковременных (≤ 100 нс) пучков, наблюдаемых в течение первой четверти периода колебаний тока разряда. В настоящей работе предполагалось, что момент генерации быстрых ионов лежит в середине этого интервала, и оценка их скорости проводилась по времени задержки соответствующего максимума сигнала относительно этого момента. Возможный разброс реального момента генерации относительно предполагаемого (~ 200 нс) устанавливает точность этой оценки. Следует отметить, что при малой длине дрейфовой трубки $L = 10$ см точность определения скорости быстрых ионов также оказалась недостаточной, и она определялась только для $L = 35$ см.

Зависимость от амплитуды разрядного тока скоростей быстрой и медленной ионных компонент, найденных описанным способом, изображена на рис. 2. Здесь также приведена подобная зависимость для скорости многозарядных ионов, полученной из результатов измерений ионным энергоанализатором в работе [8] путем усреднения по различным зарядовым компонентам. На рис. 2 показано, что во всем промежутке измерений наблюдается хорошее совпадение обеих скоростей. Этот результат свидетельствует в пользу предположения единой природы быст-

рой ионной компоненты в данных измерениях и многозарядных ускоренных ионов, ранее исследованных в работе [8]. Что касается медленной компоненты, представляющей собой основную часть ионного потока, то, как видно из рис. 2, ее скорость при малой амплитуде разрядного тока близка к скорости ионов в дуговых разрядах, с ростом амплитуды скорость ионов также растет. При токе разряда около 10 кА средняя скорость катодной струи достигает $7 \cdot 10^6$ см/с, и почти в шесть раз превышает значения, характерные для вакуумных разрядов разного типа.

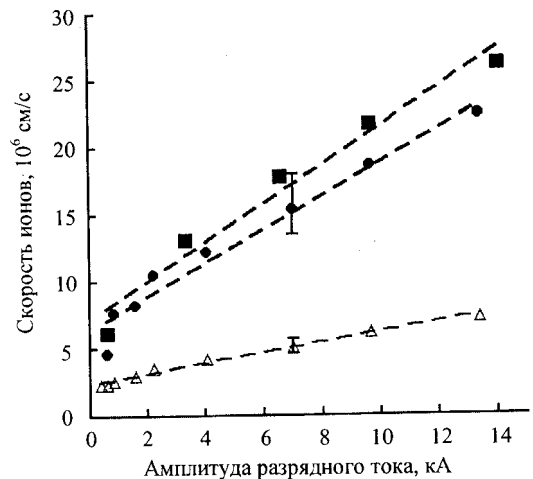


Рис. 2. Полученная по коллекторным измерениям зависимость от амплитуды разрядного тока средней скорости быстрых \bullet и медленных Δ ионов; \blacksquare – скорость многозарядных ионов, полученная из приведенных в работе [8] данных путем усреднения по зарядовому составу

Из данных, представленных на рис. 1, можно также оценить амплитуды токов ускоренных ионов и медленных ионных компонент. Эти оценки были сделаны для всего диапазона изменения разрядного тока и изображены на рис. 3, а, из которого видно, что амплитуды токов обеих ионных компонент сходным образом растут с увеличением амплитуды разрядного тока. Отсюда можно заключить, что относительная доля быстрых ионов в катодной струе остается неизменной в широком диапазоне изменения разрядного тока. Для выяснения характера движения ионов в дрейфовом промежутке за анодом для разных длин промежутка L была построена зависимость усредненной амплитуды тока основной ионной компоненты от амплитуды разрядного тока. Как видно из рис. 3, б, где изображена эта зависимость, почти во всем диапазоне разрядных токов с увеличением L амплитуда ионного тока уменьшается приблизительно как $1/L^2$, т. е. за анодом происходит свободный сферический разлет плазмы катодной струи. Этот же эффект для двух значений L наблюдался и для быстрой ионной компоненты (рис. 4).

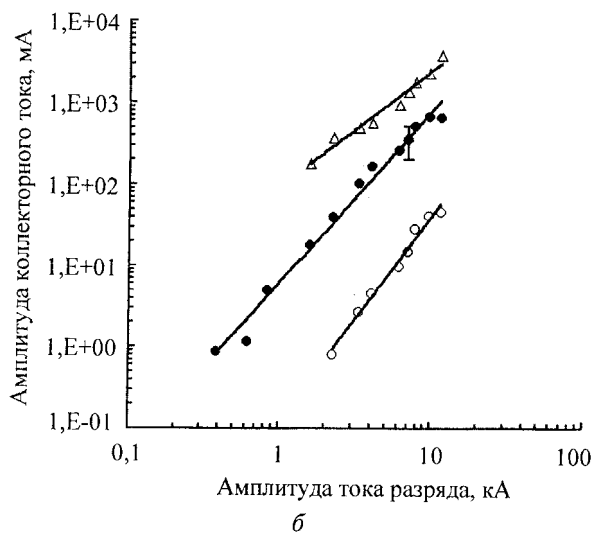


Рис. 3. Зависимость от разрядного тока средней амплитуды тока:

а — быстрых ионов □; медленных ионов — △; б — основной ионной компоненты на расстоянии от анода: 10 см — △; 35 см — ●; 95 см — ○

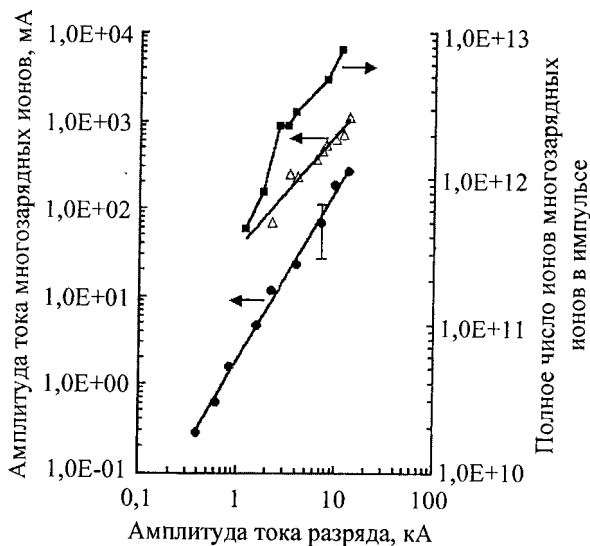


Рис. 4. Амплитуда тока многозарядных ионов в зависимости от разрядного тока для расстояний от анода:

10 см — △; 35 см — ●; та же зависимость для полного числа многозарядных ионов в импульсе ■

Оценим теперь полное число быстрых ионов в импульсе. Для заданной амплитуды разрядного тока из осциллограмм коллекторного тока и измеренной средней скорости ионов (см. рис. 2) рассчитывался их суммарный заряд в импульсе. Из него находилась оценка полного числа ионов, которая была сделана для всего диапазона измеренных токов разряда с учетом возрастания скорости ионов и роста их среднего заряда этих ионов от $Z = +4,5$ при амплитуде разрядного тока 1,2 кА до $Z = +9,3$ при токе 15 кА [8]. Эти данные приведены на рис. 4, который показывает, что число ионов быстро растет с увеличением разрядного тока, достигая при токе разряда 10 кА примерно 10^{13} ионов в импульсе для среднего ионного заряда, близкого $Z = +9$.

Обсуждение результатов

Рассмотрим сначала корректность полученной оценки полного числа быстрых многозарядных ионов. Предполагая, что отношение электронного и ионного токов в нашем случае близко к известному по измерениям в вакуумной дуге значению, лежащему для широкого круга материалов катода в диапазоне 10—20 [10], можно заключить, что при амплитуде разрядного тока 10 кА суммарный ток ионных компонент должен быть порядка 500 А, что более чем на два порядка превышает регистрируемые значения. Кратко обсудим, из чего складываются потери ионов, которыми можно объяснить наблюдаемое различие регистрируемой и ожидаемой величин ионных токов. Одной из составляющих потерь является падение концентрации ионов вследствие расширения плазменной струи в вакууме в дрейфовом промежутке. Аппроксимируя приведенные на рис. 3, б и 4 данные для значений $L = 10, 35, 95$ см непосредственно к аноду, можно получить оценку здесь ионного тока, которая лежит в диапазоне 30—100 А. Далее, как упоминалось выше, на пути ионов катодной струи от области образования до коллектора были установлены три сетки, и для расчета ионных токов использовался коэффициент геометрической прозрачности сеток. Однако их эффективная прозрачность на самом деле ниже, так как потери ионов при прохождении сетки связаны не только с поглощением проволочками, но и также с их рассеянием в электрическом поле проволочек. На еще один фактор потерь указывают результаты работы [11], где при движении катодной струи в объеме с давлением остаточного газа $P > 10^{-6}$ Торр обнаружен эффект уменьшения количества ионов материала катода с высоким средним зарядом и увеличения количества однозарядных ионов. Этот результат объясняется в [11] эффектом перезарядки ионов катодной струи на атомах остаточных газов, который в данном случае приводит к дополнительному уменьшению ионного тока на коллектор. В пользу предположения о существенной роли здесь этого эффекта свидетельствует также отмеченное выше уменьшение относительной доли быстрых многозарядных ионов в

катодной струе при ее движении в дрейфовом промежутке.

С учетом всех отмеченных факторов можно полагать, что фактический ток многозарядных ионов непосредственно за анодом действительно на два порядка превосходит наблюдаемые величины и при амплитуде разрядного тока 10 кА составляет около 100 А, при этом число многозарядных ионов в импульсе достигает, соответственно, 10^{15} .

Заключение

Полученные результаты показывают, что низковольтный вакуумный искровой разряд может быть использован для нескольких приложений. Во-первых, в качестве источника плазмы для нанесения покрытий, свойства которых зависят от скорости ионов в процессе нанесения, в частности, для углеродных алмазоподобных пленок [12]. Кроме того, можно использовать такой источник для ассистированного плазменного напыления, при этом быстрая компонента (с энергией ионов до 10 кэВ) служит для обработки пленки, нанесенной основной компонентой.

Наконец, его можно использовать в качестве источника многозарядных ионов металлов для

первой ступени мощных ионных ускорителей. В этом случае большая величина среднего ионного заряда обеспечивает достижение ионами высоких энергий даже при умеренных ускоряющих напряжениях.

Литература

1. Brown I. G. Vacuum arc ion sources// Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. № 10. P. 3061.
2. Yushkov G. Y., Anders A., Oks E. M., Brown I. G.// J. Appl. Phys. 2002. V. 88. № 10. P. 5618.
3. Лунев В. М., Овчаренко В. Д., Хороших В. М. //ЖТФ. 1977. Т. 47. № 7. С. 1486.
4. Корон Е. Д., Плютто А. А.// Там же. 1970. Т. 40. № 12. С. 2534.
5. Корон Е. Д., Плютто А. А.// Там же. 1971. Т. 41. № 5. С. 1055.
6. Astrakhantsev N. V., Krasov V. I., Paperny V. L.// J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 2514.
7. Gorbunov S. P., Krasov V. I., Paperny V. L.// Ibid. 1997. V. 30. № 4. P. 922.
8. Артамонов М. Ф., Красов В. И., Паперный В. Л.// ЖЭТФ. 2001. Т. 120. С. 1404.
9. Gorbunov S. P., Krasov V. I., Krinberg I. A., Paperny V. L.// Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V. 12. № 3. P. 313.
10. Месяц Г. А. Эктон в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. — М.: Наука. 2000. — 424 с.
11. Николаев А. Г., Окс Е. М., Юшков Г. Ю.// ЖТФ. 1998. Т. 68. № 9. С. 24.
12. Scheibe H.-J., Schultrich B., Ziegele H., Siemroth P.// Proc. XVIIth International symposium on discharge and electrical insulation in vacuum, Berkeley. USA. 1996. V. 2. P. 941.

Статья поступила в редакцию 9 августа 2005 г.

Flow of the multiply charged metallic ions from low voltage vacuum spark

S. P. Gorbunov, V. I. Krasov, V. L. Paperny
Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

A flow of cathode jet ions from a low voltage vacuum spark with discharge current being within a range of 1–10 kA has been studied experimentally. It was found that the plasma flow consists from two ion components. The main part presents the slow ions with the velocity under low discharge currents being closed to one of vacuum arcs. Velocity of the fast ion component is a few times more than one of the slow ions. Both the mean velocities and peaks of signals of both ion components increase with the discharge current. The fast ion component corresponds to beams of the multiply charged ions, that have been found by the authors earlier and their total amount approaches 10^{13} ions per a pulse at the mean ion charge being $Z = +9$ for copper ions.

УДК 533.9

Взрыв проволоки в воде. Результаты анализа порошка

В. П. Кортхонджия, В. Я. Кинцурашвили, Ц. И. Квирикашвили
Институт физики им. Э. Л. Андроникашвили Академии наук Грузии, Тбилиси, Грузия

Показано, что при взрыве проволоки в воде, когда имеет место экзотермическая химическая реакция, из-за выделения большого количества тепла происходит термическая ионизация продуктов реакции. Создается плотная плазма, и в системе образуются энергия, которая равна или больше энергии, запасенной в конденсаторной ба-