

04;10

Аномальное ускорение ионов межэлектродной плазмы в искровой стадии вакуумного разряда

© Д.Л. Шмелев, Г.А. Месяц, С.А. Баренгольц

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
Центр естественно-научных исследований Института общей физики
им. А.М. Прохорова РАН, Москва
E-mail: sb@nsc.gpi.ru

Поступило в Редакцию 9 октября 2006 г.

Предложен новый метод получения высокоэнергетичных ионных пучков с использованием искрового разряда в вакууме. Показано, что ускорение ионов происходит при наличии в межэлектродном промежутке плазменного облака. Развитие в этой плазме сильной электронной неустойчивости при прохождении катодного электронного пучка приводит к росту ее потенциала до значений, превышающих приложенную разность потенциалов. Появление аномально ускоренных ионов межэлектродной плазмы сопровождается всплеском тока в диоде.

PACS: 52.59.-f, 52.65.-y

Данная работа посвящена исследованию механизма аномального ускорения ионов в вакуумной искре. Под аномальным ускорением здесь подразумевается ускорение ионов в направлении, противоположном приложенному электрическому полю — от катода к аноду, до энергий, превышающих eU_0 , где U_0 — приложенная разность потенциалов. Возникновение групп аномально ускоренных ионов в искровой стадии вакуумного разряда экспериментально изучалось в работах [1–4]. Как показали исследования, аномально большое ускорение ионов в искровой стадии вакуумного разряда происходит только в неустойчивом режиме вакуумной искры [2,3]. Этот режим характеризуется резкими выбросами тока, амплитуда которых в 2–5 раз превосходит среднее значение и сопровождается значительным увеличением плотности пучка электронов вдоль направления ускорения ионов. Наряду с всплесками

тока отличительной особенностью неустойчивого режима вакуумной искры является рост потенциала периферийных слоев плазмы катодного факела до 80%, приложенной к промежутку разности потенциалов.

Сценарий аномального ускорения ионов в искровой стадии вакуумного разряда предложен в работе [5]. Согласно этому сценарию, ионы ускоряются электростатическим полем глубокой нестационарной потенциальной ямы, формируемой электронным пучком при резком повышении потенциала на границе плазмы катодного факела. Отличие физических процессов, рассматриваемых в данной работе, состоит в том, что здесь предполагается существование плазменного облака в пространстве между катодной плазмой и анодом. Это может быть плазма, возникшая в процессе поджига, анодная плазма или плазма, оставшаяся от взрыва соседнего микроострия. Появление этого плазменного облака может быть связано, в частности, с влиянием предимпульса. Экспериментально установлено (впервые в работе [6]), что подача двух последовательных импульсов напряжения приводит к резкому увеличению тока на втором импульсе. Детально этот вопрос исследовался авторами работы [7], которые установили, что в зависимости от интервала между импульсами и амплитуды напряжения величина тока второго импульса может возрасти на порядок. Как уже отмечалось выше, аналогичный рост тока имеет место и при появлении аномально ускоренных ионов.

Для исследования физических процессов в вакуумном диоде при наличии межэлектродной плазмы решалось уравнение Пуассона методом частиц в ячейках (PIC). Интерполяция сил и раздача заряда проводились по двум ближайшим узлам сетки (CIC). Число частиц в представленных расчетах до $3 \cdot 10^6$. При расчетах использовалась следующая конфигурация электродов. Межэлектродное расстояние — 2 см, на расстоянии 0.4 см от катода находилось межэлектродное плазменное облако протяженностью 1 см. Катодная плазма занимала промежуток 0.1 см от катода. Оба плазменных облака в начальный момент нейтральны. Анод представлял собой полупрозрачную сетку, которая поглощала половину проходящих частиц. Эти поглощенные частицы формировали осциллограмму анодного тока. За анодом на расстоянии 2 см располагался третий электрод, который имел анодный потенциал. Эта область моделировала дрейфовое пространство.

Расчеты проводились для медного катода, соответственно оба плазменных облака представляли собой медную плазму, образующуюся

при эктонных процессах на катоде. В качестве начальных условий использовались параметры медной плазмы, полученные при моделировании эктонных процессов [8]. Плотность катодной плазмы в начальный момент составляла $\cdot 10^{12} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, межэлектродная плазма имела плотность на порядок ниже. Температура электронов — 4 eV, температура ионов — 0.1 eV. Плазма считалась бесстолкновительной, заряд ионов в процессе расчета не менялся.

В результате численного моделирования получена следующая картина физических процессов в вакуумных диодах при наличии межэлектродной плазмы. При подаче напряжения на анод и третий электрод электроны эмитируются только правой границей межэлектродной плазмы. Но, поскольку межэлектродное облако не имеет контакта с катодом, оно быстро поляризуется и приобретает положительный потенциал. Между плазменными облаками возникает разность потенциалов, и катодная плазма тоже начинает эмитировать электроны (рис. 1, *a*).

Катодный электронный пучок взаимодействует с межэлектродной плазмой через электрическое поле (столкновений нет) и возбуждает электронные и ионно-звуковые колебания. В результате электроны межэлектродного облака получают дополнительную энергию и покидают межэлектродный промежуток. Ионы движутся гораздо медленнее электронов, поэтому потенциал межэлектродного облака увеличивается. Увеличение разности потенциалов интенсифицирует катодный электронный пучок, который, в свою очередь, увеличивает положительный потенциал межэлектродного облака и т.д. В результате плазма приобретает потенциал, в несколько раз превышающий анодный потенциал U_0 (рис. 1, *b*). Разность потенциалов между анодом и межэлектродным облаком становится отрицательной. Поэтому ионы на правом краю межэлектродного облака ускоряются в сторону анода (рис. 1, *c*). Одновременно с левого края межэлектродного облака ионы ускоряются в сторону катода. Между катодной и межэлектродной плазмой образуется двойной слой. Пучок электронов формирует виртуальный катод в пространстве между анодом и третьим электродом. Поэтому ионы, миновавшие анод, продолжают ускоряться при влете в дрейфовое пространство. Процесс ускорения ионов прекращается при распаде межэлектродного облака.

На рис. 2 показано распределение ионов меди Cu^+ по энергиям на аноде и на третьем электроде. Видно, что уже в межэлектродном промежутке ионы получают энергию выше приложенного напряжения.

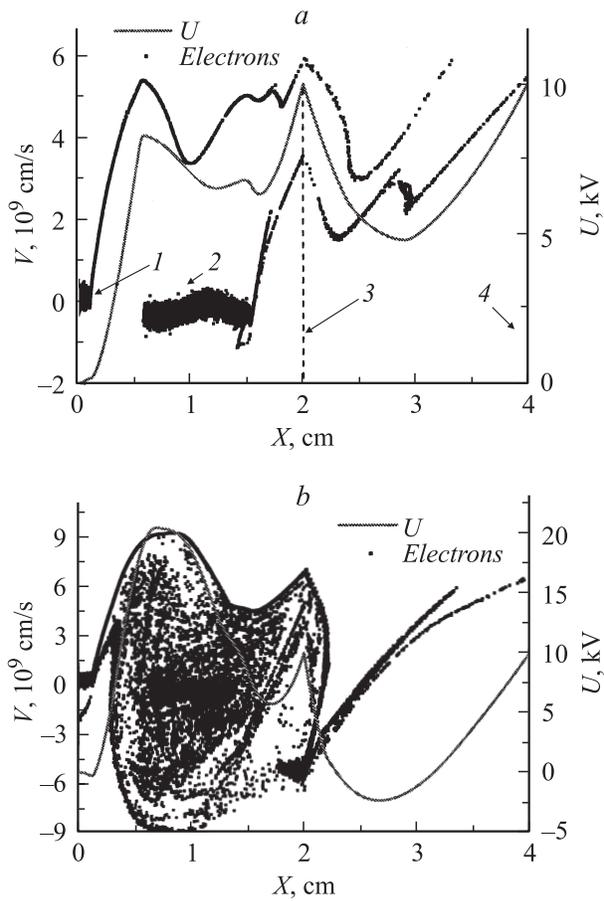


Рис. 1. Фазовые портреты частиц и распределение потенциала в промежутке, $U_0 = 10$ kV. *a* — электроны, время 0.7 ns. 1 — катодная плазма, 2 — межэлектродная плазма, 3 — положение полупрозрачного анода, 4 — третий электрод (имеет анодный потенциал). *b* — электроны, время 40 ns. *c* — ионы, время 40 ns.

Продолжая ускоряться при влете в дрейфовое пространство, ионы примерно в два раза увеличивают свою энергию. Расчеты показали, что эффективность ускорения уменьшается с увеличением анодного

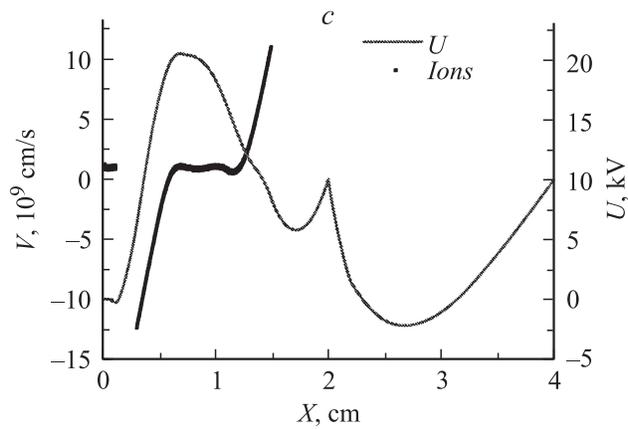


Рис. 1 (продолжение).

напряжения. Так, например, при увеличении напряжения в десять раз коэффициент пропорциональности $E/(eU_0)$ максимальных энергий ионов на третьем электроде уменьшается с ~ 4.7 ($U_0 = 10$ kV) до

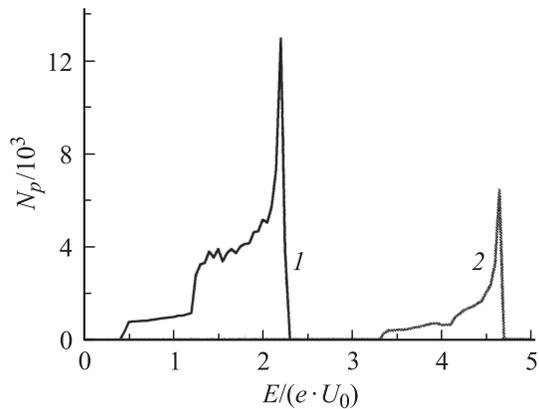


Рис. 2. Распределение ускоренных ионов Cu^+ по энергиям. $U_0 = 10$ kV, данные накоплены в течение 150 ns. 1 — распределение на аноде, 2 — распределение на третьем электроде.

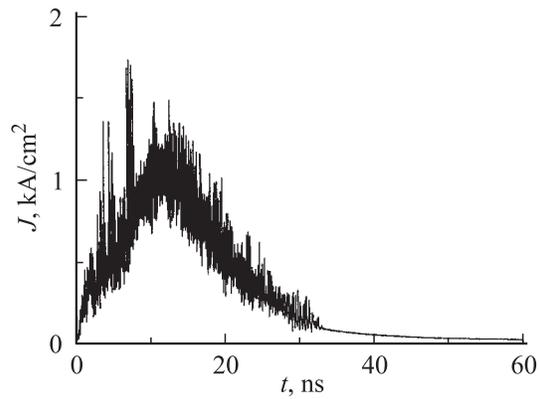


Рис. 3. Зависимость плотности тока на аноде от времени, для $U_0 = 100$ кВ.

~ 3.2 ($U_0 = 100$ кВ). Аналогично эффективность ускорения падает и при уменьшении массы ионов межэлектродной плазмы. Ионы водородной плазмы ускорялись лишь до энергии порядка 2 кВ при анодном напряжении 10 кВ. Это связано с уменьшением времени распада межэлектродного плазменного облака при увеличении напряжения или снижении массы ионов. В случае водородной плазмы межэлектродное облако распадается так быстро, что сильная неустойчивость даже не успевает развиваться. В то же время, если среди основной массы тяжелых ионов межэлектродного облака существует небольшая примесь легких ионов, то эти ионы будут ускоряться не менее эффективно, чем основные ионы.

На рис. 3 показана зависимость плотности анодного тока от времени. Легко видеть, что средняя линия плотности тока имеет колоколообразный характер, т.е. существует всплеск тока. Максимум средней линии соответствует моменту времени, когда ускоренные ионы достигают анода. Сильные осцилляции отражают факт существования в плазме сильной неустойчивости. Распад межэлектродной плазмы приводит к прекращению осцилляций тока и соответственно завершению процесса ускорения ионов.

Для выяснения зависимости ускорения ионов от их заряда был проведен расчет с ионами разных зарядов. В этих расчетах катодная

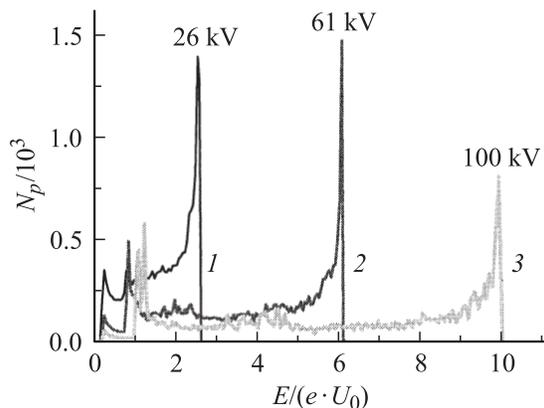


Рис. 4. Результаты расчетов для плазмы, содержащей ионы Cu^+ , Cu^{++} , Cu^{+++} в равных долях, U_0 — 10 кВ. Распределение ионов по энергиям на аноде, данные накоплены в течение 180 нс. 1 — Cu^+ , 2 — Cu^{++} , 3 — Cu^{+++} .

и межэлектродная плазма содержала ионы меди с зарядами от +1 до +3. Процентные доли ионов разных зарядов были равны. Результаты расчетов с многозарядными ионами показаны на рис. 4. Видно, что максимальные энергии ионов растут с увеличением заряда приблизительно пропорционально Z . Коэффициент пропорциональности $E/(eZU_0)$ максимальных энергий на аноде близок к 3.

Таким образом, предложен новый механизм эффекта аномального ускорения ионов в искровой стадии вакуумного разряда. Показано, что это ускорение возникает, когда в межэлектродном промежутке находится плазменное облако, в котором развивается сильная электронная неустойчивость под действием пучка электронов, эмитируемого катодной плазмой. В ускорении участвуют только ионы межэлектродной плазмы. Полученные результаты открывают перспективы создания мощных импульсных источников ионов на основе искрового разряда в вакууме при использовании повторяющихся импульсов напряжения в десятки-сотни наносекунд.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 05-02-17650, 05-02-17612.

Список литературы

- [1] *Плютто А.А.* // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. В. 6. С. 1589–1592.
- [2] *Корол Е.Д., Плютто А.А.* // ЖТФ. 1970. Т. 40. В. 12. С. 2534–2537.
- [3] *Корол Е.Д.* // ЖТФ. 1976. Т. 46. С. 2187–2190.
- [4] *Артамонов М.Ф., Красов В.И., Паперный В.Л.* // ЖЭТФ. 2001. Т. 120. В. 6. С. 1404–1410.
- [5] *Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Перельштейн Э.А.* // ЖЭТФ. 2000. Т. 118. С. 1358–1365.
- [6] *Бугаев С.П., Загулов Ф.Я., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А.* // Изв. вузов. Физика. 1968. № 1. С. 145–147.
- [7] *Баженов Г.П., Ротштейн В.П.* // Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных электронов. Новосибирск: Наука, 1974. С. 67.
- [8] *Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Шмелев Д.Л.* // ЖЭТФ. 2001. Т. 120. С. 1227–1236.