

04

Энергомассовый состав плазмы поверхностного наносекундного разряда

© С.В. Барахвостов, И.Л. Музюкин

Институт электрофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург

E-mail: lfd@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 28 мая 2004 г.

Проведены исследования состава плазмы, образующейся в результате наносекундного высоковольтного разряда по поверхности диэлектрика в вакууме. В результате исследований выявлены потоки ионов со скоростями порядка нескольких сотен километров в секунду. Энергетическое распределение ионов простирается от сотен eV до единиц keV.

Введение. Понимание процессов образования энергетического и зарядового составов плазмы в вакуумном высоковольтном пробое по поверхности имеют большое значение для создания новых источников многозарядных высокоэнергетических ионов. Пробой по поверхности является одним из самых эффективных методов создания плазмы с высоким содержанием многозарядных ионов. Вместе с тем наличие скоростной составляющей ионного потока позволяет использовать этот разряд в качестве источника ускоренных ионов без применения дорогих и громоздких специализированных ионных ускорителей. Известно, что возможность получения многозарядных ионов в плазме на завершающей дуговой стадии перекрытия диэлектриков в вакууме определяется величиной тока в дуге, достигающего величины $I = 10^4 - 10^5$ А, при микросекундной длительности процесса [1]. В то же время на стадии распространения наносекундного поверхностного разряда при скоростях $v \sim 10^6$ м/с в его головной части создаются условия, при которых можно ожидать высокой степени ионизации вещества при существенно меньших значениях тока $I < 100$ А. Ранее было проведено фотохронографирование физических процессов при высоковольтном наносекундном вакуумном разряде с анода по поверхности диэлектрика. Результаты измерений показали, что распространение разряда происходит со скоростями $\approx 5 \cdot 10^6$ м/с. Следовательно, в нашем случае можно было ожидать присутствия в плазме многозарядных ионов.

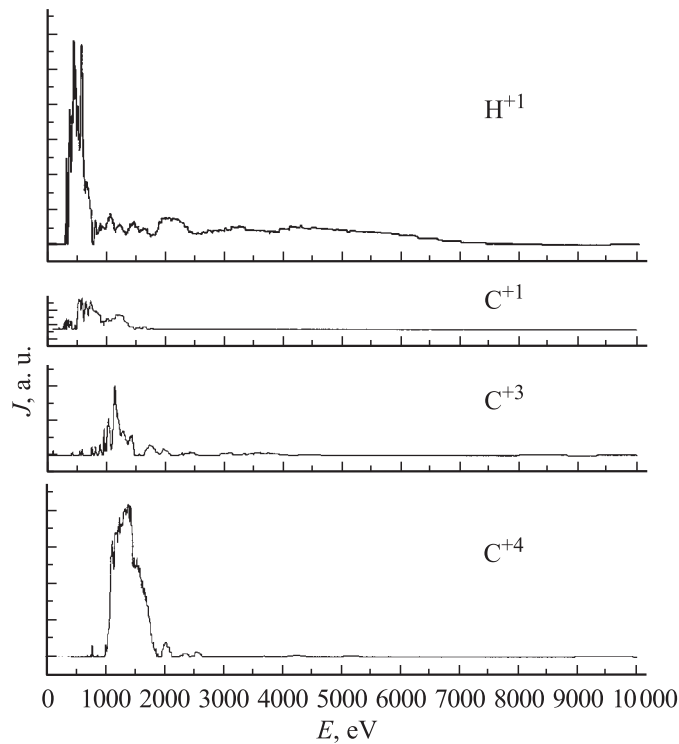


Рис. 1. Спектры ионов при разряде по полиэтилену.

Экспериментальная установка и методика. Эксперименты проводились в вакууме 10^{-6} Торр. Разрядный промежуток представлял собой коаксиальную систему электродов с анодом в центре. Вакуумный прикатодный промежуток составлял 0.5 mm. Исследовались разряды по поверхности полиэтилена высокого давления и фторопласта. Высоковольтный импульс длительностью 3 ns имел амплитуду 150 kV и фронт ≈ 200 ps. В процессе обработки сигналов с коллектора ионов при разряде по фторопласту было установлено, что максимальная скорость ионов равна $3 \cdot 10^5$ m/s при средней скорости $1.5 \cdot 10^5$ m/s.

Для исследований энерго-масс-зарядового состава потока плазмы использовался метод парабол Томсона. Интенсивность свечения различных участков спектрограммы оцифровывалась и накапливалась в течение

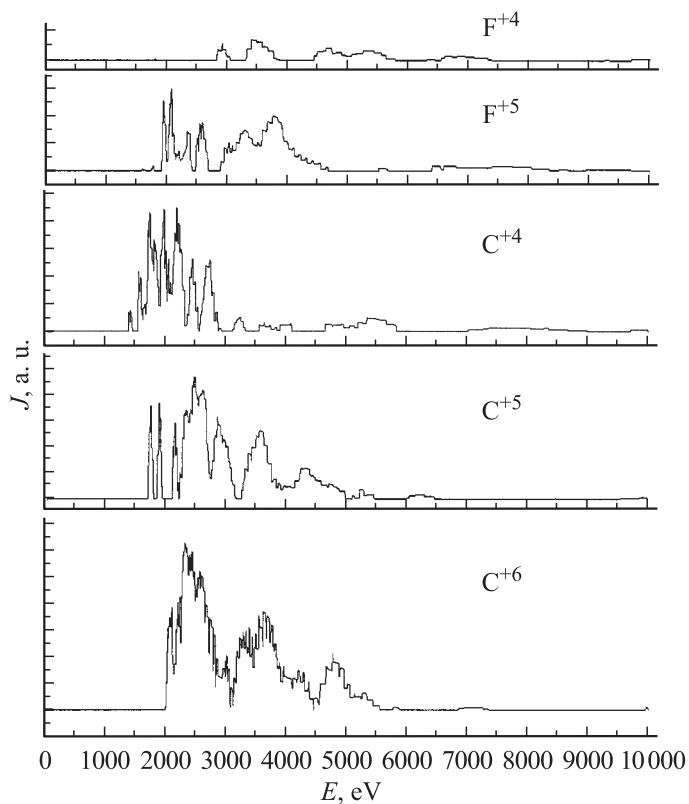


Рис. 2. Спектры ионов при разряде по фторопласту.

ние десятков единичных измерений. Каждая полученная спектрограмма есть результат накопления до 50-ти отдельных разрядов. Метод накопления позволял выявить части ионного спектра, не видимые в единичном измерении. На полученные накопленные спектрограммы накладывались расчетные параболы и рассчитывалась относительная интенсивность для каждого участка расчетной параболы. В результате получались распределения интенсивности потока ионов от заряда, массы и энергии. Калибровка спектрометра осуществлялась по сигналу ионов Н при использовании в качестве рабочего диэлектрика полиэтилена высокого давления.

Таблица 1.

Ион	Содержание, %	Средняя энергия, eV
H + 1	60	7239
C + 4	26	1558
C + 3	6.6	1622
C + 1	6.9	1061

Таблица 2.

Ион	Содержание, %	Средняя энергия, eV
C + 6	37.8	3240
C + 5	24.7	3057
C + 4	17.7	2900
F + 5	15.5	3779
F + 4	4.2	4727

Результаты и обсуждение. В результате исследования энергозарядового состава были выявлены высокоэнергетичные многозарядные ионы. В табл. 1 и 2 представлены составы и средние энергии ионов разных фракций для полиэтилена и фторопласта. Для этих распределений характерно превалирование многозарядных ионов (4–6) над малозарядными (1–3). Энергетические распределения для каждой ионной фракции представлены на рис. 1 (полиэтилен) и рис. 2 (фторопласт). В разряде на полиэтилене выявлена группа ионов водорода ускоренных до энергий — 20–30 keV. В этой группе наблюдается основной пик на 15 keV. Одной из особенностей спектров является наличие множества интенсивных пиков. Каждый такой пик имеет ширину в несколько сотен eV и имеет в целом колоколообразную форму. Всего спектры имеют ширину в 2–3 keV. Наличие множества пиков интенсивности на усредненных спектрах может свидетельствовать о существовании нескольких основных режимов ускорения ионов. Большой отрыв легких ионов водорода по энергиям может свидетельствовать о том, что ускорение происходит электрическими полями в плазме. Наиболее вероятным механизмом представляется ускорение ионов в области

кинетических плазменных неустойчивостей, в которых присутствуют нестационарные высокочастотные электрические поля [2]. Нарушение процентного содержания ионов для полиэтилена требует дальнейшего изучения.

Выводы. Результаты экспериментов показывают, что наносекундный высоковольтный разряд по поверхности является эффективным источником многозарядных высокоэнергетичных ионов. В сочетании с простой конструкцией и наличием генераторов наносекундных импульсов это делает подобный метод очень привлекательным для разработки ионных источников. Большой отрыв по энергиям для ионов водорода в случае разряда по полиэтилену свидетельствует в пользу ускорения ионов электрическими полями в плазме.

Работа выполнена по программе фундаментальных исследований Президиума РАН „Теплофизика и механика интенсивных энергетических воздействий“ и при частичной поддержке гранта РФФИ № 02–02–17509 и 02–02–17002.

Список литературы

- [1] Браун Я. Физика и технология источников ионов. М.: Мир, 1998. 496 с.
- [2] Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. М.: Атомиздат, 1977. 360 с.