

04;12

## Угловая зависимость энергомассового состава плазмы вакуумного пробоя по поверхности

© С.В. Барахвостов, И.Л. Музюкин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург  
E-mail: lfd@iep.uran.ru

Поступило в Редакцию 2 сентября 2004 г.

В окончательной редакции 15 ноября 2004 г.

Ранее были проведены измерения энергетического и масс-зарядового состава плазмы вакуумного перекрытия диэлектрика. Эти измерения проводились при положении анализатора по нормали к поверхности диэлектрика. В результате выявлено наличие многозарядных и высокоэнергетичных ионов. Данная работа представляет первые результаты измерений зависимости энергетического и масс-зарядового состава плазмы от угла к поверхности диэлектрика.

**Экспериментальная установка и методика.** Эксперименты проводились в вакууме  $10^{-4}$  Па. Исследовались разряды по поверхности полиэтилена высокого давления. Высоковольтный импульс длительностью 3 ns имел амплитуду 150 kV и фронт  $\approx 200$  ps. Схема установки представлена на рис. 1. В данном исследовании в отличие от [1] использовалась линейная схема. Катод крепился к диафрагме с отверстием, служившей также первой диафрагмой коллиматора анализатора Томсона. Диафрагма располагалась на расстоянии 10 mm от поверхности диэлектрика, диаметр отверстия в диафрагме составлял 1 mm. Пробой происходил между анодом 1 и заземленным катодом 2 по плоской грани диэлектрического полуцилиндра, закрепленного в диэлектрическом держателе. Полуцилиндр мог вращаться вокруг своей оси на  $\pm 45^\circ$ . Для исследований энерго-масс-зарядового состава потока плазмы использовался метод парабол Томсона. Частицы, прошедшие формирующую систему диафрагм 2, 3 попадали в область электрического и магнитных полей, параллельных друг другу 4, где происходит разделение потока ионов по энергиям и зарядам. После прохождения отклоняющего промежутка частицы попадают в область свободного распространения и

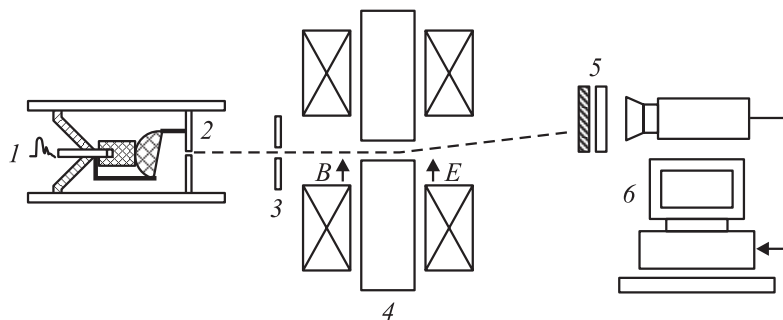
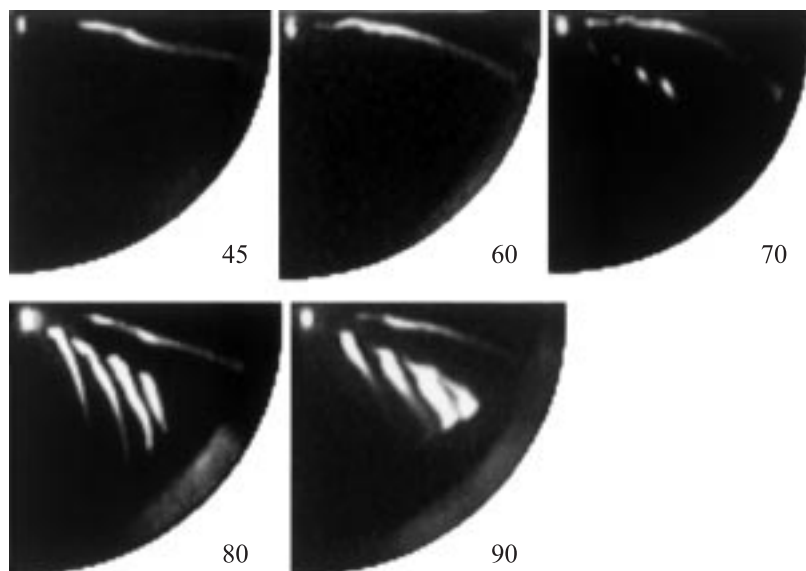


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

после этого на вход микроканальной пластины 5. Электронный поток с выхода микроканальной пластины, пропорциональный ионному потоку на входе, попадает на люминофорный экран. Интенсивность свечения различных участков поверхности люминофора оцифровывалась CCD матрицей и накапливалась в течение десятков единичных измерений с помощью компьютера 6. Каждая полученная спектрограмма есть результат накопления до 50 отдельных разрядов. Метод накопления позволял выявить части ионного спектра, не видимые в единичном измерении. На полученные накопленные спектрограммы накладывались расчетные параболы и рассчитывалась интенсивность для каждого участка параболы. В результате получались распределения интенсивности потока ионов от заряда, массы и энергии.

**Результаты и обсуждение.** В результате исследования получены распределения потока ионов по зарядам, массам и энергиям для пяти положений поверхности диэлектрика. Характерные спектрограммы представлены на рис. 2. Видно, что для углов, далеких от нормали, единственной составляющей ионного потока является  $H^{+1}$ . На угле в  $70^\circ$  появляются слабые следы углерода. На углах  $80$  и  $90^\circ$  интенсивность потока углерода резко возрастает и превышает интенсивность водорода. При этом растет не только яркость, но и ширина парабол (до трех раз относительно водородной параболы), что является большой неожиданностью. Наиболее простым объяснением данного результата может являться уширение пучка ионов под воздействием электростатических сил отталкивания в области свободного пролета между полевыми нако-



**Рис. 2.** Вид спектрограмм для различных положений поверхности диэлектрика.

нечниками и детектором. Скорости потока ионов углерода существенно меньше скоростей водорода, следовательно, время, в течение которого действуют силы отталкивания больше. В этом случае, однако, должна наблюдаться явная зависимость ширины параболы в данной точке от значения соответствующей скорости ионов. Параболы должны были бы явно расширяться от центра к периферии. Кроме того, в проведенных ранее [1] измерениях подобного эффекта не наблюдалось. Ширина парабол для всех фракций была одинакова и содержание водорода в общем потоке составляло около 60% для направления, нормального к поверхности. Также для направления  $80^\circ$  параболы углерода не расширяются при примерно равной интенсивности и относительном содержании. Другим возможным объяснением может являться различие в характерах ускорений легких и тяжелых элементов при разлете плазмы в вакуум. Водород ускоряется непосредственно вблизи поверхности разряда, а углерод ускоряется после прохождения диафрагмы

Относительное содержание и средние энергии ионных фракций

	H <sup>+1</sup>	C <sup>+4</sup>	C <sup>+3</sup>	C <sup>+2</sup>	C <sup>+1</sup>
90°	11% 1425 eV	15% 1087 eV	22% 798 eV	24% 795 eV	28% 682 eV
80°	8% 1553 eV	16% 1917 eV	29% 1583 eV	24% 1252 eV	23% 1130 eV
70°	55% 5497 eV	18% 1705 eV	14% 1619 eV	5% 1369 eV	8% 1088 eV
60°	100% 4428 eV				
45°	100% 3671 eV				

на расстоянии свыше 10 mm. В результате отображаемая поверхность ускорения водорода ограничивается отверстием в диафрагме 1 mm, ионы углерода попадают в отверстие диафрагмы под более широким телесным углом и ускоряются в пространстве за диафрагмой. Таким образом, ширина зоны ускорения не ограничена отверстием и площадь, дающая вклад в суммарную интенсивность, существенно больше, чем в случае с водородом. Этим может объясняться превышение интенсивности потока углерода над водородом. При этом данное описание действительно только в направлении максимальной интенсивности потока углерода 90° к поверхности разряда. При меньших углах (70°, 60°, 45°) интенсивность потока углерода меньше и область ускорения за диафрагмой не образуется. Усредненные значения долей в потоке и средние энергии для каждого сорта ионов для различных положений поверхности представлены в таблице.

Согласно представленной таблице, средние энергии явно зависят от заряда иона. Не выявлено монотонной зависимости средних энергий ионов от угла к катодной поверхности. Однако видно, что при приближении к нормали к поверхности диэлектрика средние энергии имеют тенденцию к уменьшению. Особенности сигнала потока ионов углерода в направлении, нормальном к поверхности разряда, показывают, что внесены значительные помехи в обычный механизм разлета плазмы. Общая интенсивность ионного потока заметно увеличивается в направлении, нормальном к поверхности диэлектрика. Представленная методика не в состоянии дать количественную оценку зависимости величины полного ионного потока от угла.

**Выводы.** Результаты экспериментов показывают, что более тяжелые ионы имеют более резкую направленность по оси, нормальной к

поверхности разряда. Области ускорения легких и тяжелых ионов, возможно, находятся на разном удалении от поверхности разряда. Область ускорения ионов углерода может распространяться на расстояния, превышающие 10 mm.

Работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ № 02–02–17509 и 02–02–17002.

### **Список литературы**

- [1] *Барахвостов С.В., Музюкин И.Л.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 21. С. 27–31.