

## НАГРЕВ ЭЛЕКТРОНОВ В КАТОДНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ СИЛЬНОТОЧНОГО РАЗРЯДА

*В.И.Барышников, В.Л.Паперный*

1. Измерения параметров генерируемой катодом струи металлической плазмы в вакуумных разрядах дали значения температуры электронов  $T_e < 10$  В [1,2]. Эти данные получены как для стационарных разрядов типа "вакуумная дуга", так и для импульсных систем с током разряда 1 кА и скоростью нарастания тока  $dI/dt < 10^{12}$  А/с в диапазоне напряжений разряда от десятков вольт до сотен киловольт. Согласно существующим представлениям параметры плазменной струи в таких разрядах контролируются процессами диссипации в плотной прикатодной плазме, где на расстоянии  $< 10^{-3}$  см от катода величина  $T_e$  достигает максимума и падает при дальнейшем расширении плазменной струи в вакуумный межэлектродный промежуток (см., например, [3]).

В данной работе проведены измерения спектра рентгеновского излучения прикатодной области плазмы вакуумного разряда с высокой скоростью нарастания тока.

2. Эксперименты проводились в миниатюрном электронном ускорителе [4]. Схема измерений приведена на рис. 1. На катод 1, представляющий собой торец трубки из танталовой фольги, диаметром 4 мм, толщиной стенки 0.1 мм подавался импульс напряжения амплитудой  $V = 300$  кВ. Анодом служили стенки алюминиевой коаксиальной вакуумной камеры 2. Длина разрядного промежутка составляла 4 см. Остаточное давление в камере при безмасляной вакуумной откачке составляло 0.1 Па.

Измерения спектра рентгеновского излучения из объема производились методом поглотителей. Ось наблюдения параллельна плоскости катода (позиция А на рис. 1). В качестве детектора использовался стандартный люминесцентный экран 3, представляющий собой стеклянный фланец с нанесенным на него слоем катодолуминофора ( $ZnS$ , излучательное время 70 нс, толщина 2 мкм), покрытым пленкой алюминия, толщиной  $\lesssim 0.1$  мкм. Экран располагался на расстоянии 20 см от катода. Световой сигнал с экрана через световод 4 передавался на ФЭУ 5, снабженный набором

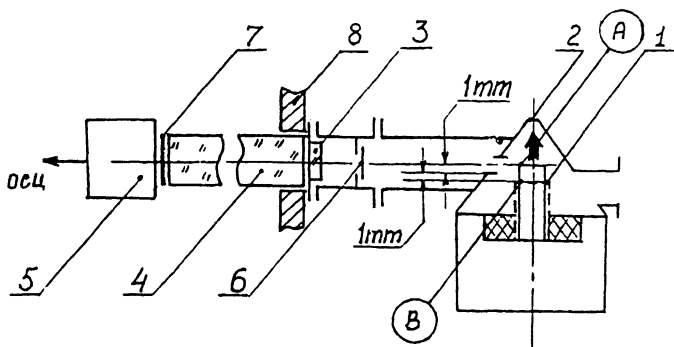


Рис. 1. Схема эксперимента.

поглотителей 7, выходной сигнал которого регистрировался осциллографом. Между экраном и источником располагалась кассета с поглотителями 6, в качестве которых использовались полипропиленовые пленки толщиной 3.7; 11.1; 40.0; 70.0 мкм. Оптическая система была снабжена защитой от жесткого рентгеновского излучения 8.

3. Длительность импульса тока  $t$  определялась по времени излучения возбуждаемого электронным пучком особо чистого кристалла сапфира. Сигнал регистрировался PIN-диодом на стробоскопическом осциллографе с временным разрешением 1 нс и имел длительность, не превышающую этого значения. Заряд в импульсе определялся calorиметрическим методом, нормировался на полученную длительность, откуда находилась величина тока в импульсе  $I \approx 4$  кА (т. е.  $dI/dt > 10^{13}$  А/с).

Измерения с помощью описанного детектора дали набор осциллограмм сигналов, полученных с различными поглотителями. На рис. 2 приведены отношения амплитуд этих сигналов (через 5 нс после начала импульса) и сигнала детектора без поглотителя, когда излучение ослабляется только в алюминиевом покрытии экрана. Из рисунка видно, что экспериментальные данные с удовлетворительной точностью аппроксимируются кривыми поглощения полипропиленовыми пленками различной толщины тормозного рентгеновского излучения электронов плазмы с температурой в диапазоне 1.0–1.4 кэВ. При построении кривых мы пренебрегли поглощением в алюминиевом покрытии экрана, по расчетам составляющим для  $T$  1 кэВ менее 25% уровня сигнала.

Измерения с анодом из тантала дали близкие результаты, следовательно, регистрируемый сигнал не связан с тормозным или характеристическим излучением анода. При сдвиге катода на 2 мм (позиция на рис. 1), так что его

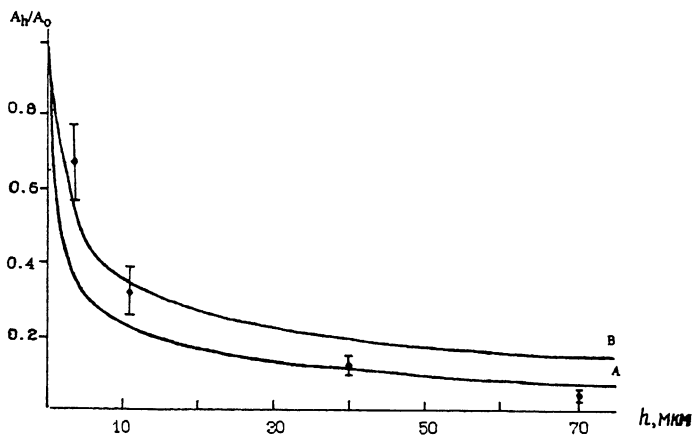


Рис. 2. Кривые поглощения полипропиленовыми пленками тормозного рентгеновского излучения плазмы с температурой электронов: А —  $T_e = 1.0$  кэВ, В —  $T_e = 1.4$  кэВ; точки — экспериментальные значения.

поверхность выходила из поля зрения детектора, уровень сигнала уменьшался ниже порога регистрации. Эти данные свидетельствуют, что излучение генерируется прикатодной областью плазменной струи. С целью локализации этой области были проведены измерения менее чувствительным, но более скоростным детектором, показавшие, что описанное выше излучение регистрируется в течение интервала  $t$ , не превышающего временного разрешения детектора, т. е.  $\sim 15$  нс с момента начала разряда. Учитывая, что скорость движения плазмы в вакуумных разрядах  $V < 2 \cdot 10^6$  см/с [5] в широком диапазоне напряжений, заключаем, что согласно прямым измерениям область горячих электронов локализована на расстоянии  $d < V \cdot t = 3 \cdot 10^{-2}$  см от катода. Однако можно предположить, что фактически величина  $t$  не превышает длительности самого разряда, поскольку только в течение этого времени происходит нагрев электронов протекающим в плазме током, а в дальнейшем плазма охлаждается при расширении в вакуум. Отсюда находим оценку величины  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  см.

Авторы благодарны И.А. Крипбергу за полезные обсуждения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (коды проектов 93-02-17417 и 93-02-15736).

## Список литературы

- [1] *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 536 с.
- [2] *Anders S., Anders A.* // *Contrib. Plasma Phys.* 1989. V. 29. N 4/5. P. 537-543.
- [3] *Hantzshe E.* // *J. Phys. D.: Appl. Phys.* 1991. V. 24. P. 1339-1353.
- [4] *Барышников В.И., Мартынович Е.Ф.* // Информационный листок ВДНХ СССР, 1994.
- [5] *Месяц Г.А., Ротштейн В.П., Фурсей Г.В., Карцев Г.К.* // *ЖТФ.* 1970. Т. 40. С. 1551-1556.

Поступило в Редакцию  
21 октября 1994 г.  
В окончательной редакции  
16 февраля 1995 г.

---