

КОЛЬЦЕВЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ В КОРОНЕ ПРОВОЛОЧКИ, ВЗОРВАННОЙ ТОКОМ

И.К.Айвазов, Л.Е.Аранчук, С.Л.Боголюбский,
Г.С.Волков

С помощью разрешенных во времени рентгеновских фотографий показано, что стадии развития перетяжек предшествует появление перегретых кольцевых структур. Их происхождение объясняется образованием токовых слоев.

Эффект образования "горячих точек", в результате взрыва проволочки в диодах мощных ($10^{11} \div 10^{12}$ Вт) генераторов релятивистских электронных пучков (РЭП) хорошо известен. Уже в работе¹ сообщалось, что в плазменном канале взорвавшейся проволочки из материала с большим Z возникают горячие образования, а канал подвержен МГД неустойчивости типа перетяжек. С целью выяснения природы "горячих точек" на ускорителе "Тритон" была проведена серия экспериментов, в которых плазменный канал создавался при пропускании импульса тока длительностью $\tau_{1/2} \simeq 50$ нс и амплитудой $\lesssim 200$ кА по вольфрамовым проволочкам $\varnothing 10$ и 50 мкм и длиной 12 мм. Осуществлялась двухкадровая регистрация изображения плазменного канала в спектральном диапазоне $\epsilon \gtrsim 0,5$ кэВ мольбертными рентгеновскими наносекундными ЭОПами² с временным разрешением ~ 5 нс, интегральные изображения фиксировались с помощью многодырочных рентгеновских камер-обскур с набором поглотителей. Одновременно проводились измерения разрешенного

во времени абсолютного спектра мягкого рентгеновского (МР) излучения³. Обработка сигналов электротехнических датчиков с учетом индуктивной составляющей показала, что при электрическом взрыве проволочек $\varnothing 10$ и 50 мкм создается примерно одинаковая нагрузка $0,5 - 4$ Ом. Сигналы ультрамягкого рентгеновского излучения ($E \lesssim 10$ кэВ), рис. 1, б, возникают одновременно с появлением на сигнале тока высокочастотных колебаний, рис. 1, а. Изображения плазменного канала, получаемые с помощью ЭОПов в окрестности максимума сигналов УМР излучения, имеют неоднородную трубчатую структуру с внешним диаметром вблизи катода ~ 400 мкм, который возрастает к аноду, и толщиной стенки трубы $\lesssim 80$ мкм (предел пространственного разрешения). Плазма скин-слоя оптически прозрачна для собственного излучения и имеет температуру $T_e = 500 \div 800$ эВ. В сложной по структуре короне можно выделить более яркие кольцевые структуры, сосредоточенные, в основном, в прикатодной области, которые на ЭОПограммах выглядят как пятна (показаны стрелками на рис. 2, а), расположенные в стенках трубы, как показывает фотографирование под разными углами, азимутально симметрично относительно оси трубы. Процесс образования "горячих точек" довольно сложен и, по-видимому, неоднозначен, но можно утверждать, что в наших экспериментах при взрыве проволочки $\varnothing 10$ мкм существуют высокотемпературные образования на оси, которые появляются путем уменьшения за время < 10 нс диаметра плазменного канала в областях перегретых колец до пределов пространственного разрешения ЭОПов (рис. 2, б), причем этот процесс в разных точках плазменного шнура идет в различные временные интервалы разряда.

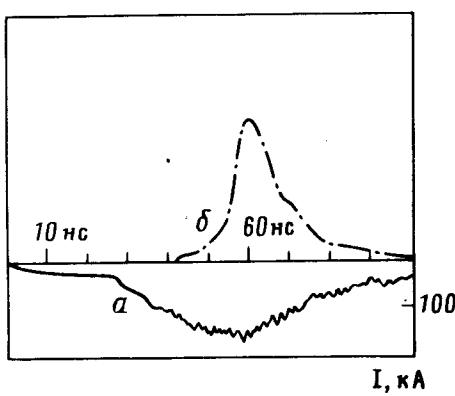


Рис. 3

Соответствующие рентгеновские интегральные обскуrogramмы, полученные в том же спектральном диапазоне, выглядят как наложенные друг на друга изображения трубы короны и поперечных полос между стенками трубы, рис. 3, а. На более жестких интегральных

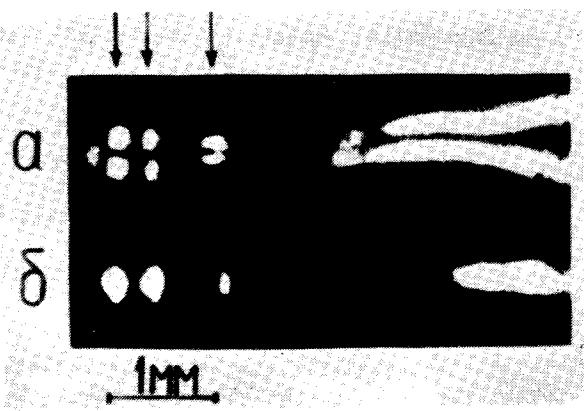
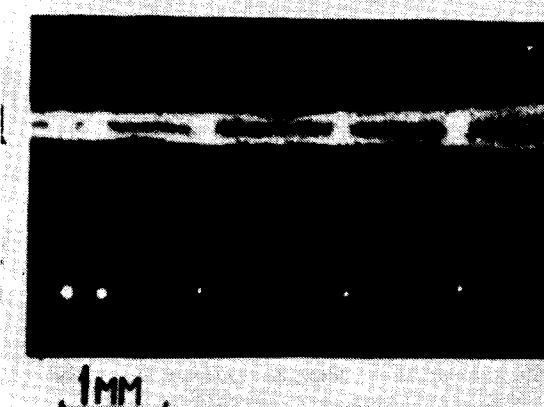


Рис. 2

Рис. 1. Осциллограммы сигналов тока через проволочку – (а) и МР излучения, регистрируемого вакуумным фотоэмиссионным детектором с фильтром 3 мкм лавсана – (б)

Рис. 2. (а, б) ЭОПограммы плазменного канала взорванной проволочки; стрелками показаны кольцевые образования. Интервал между кадрами – 10 нс

Рис. 3. (а, б) интегральные рентгеновские обскуrogramмы плазменного канала взорванной проволочки, полученные в разных спектральных диапазонах



обскуrogramмах (энергия отсечки фильтров 2 кэВ), изображение короны отсутствует, а на месте полос видны "горячие точки" размером $\lesssim 80$ мкм (предел разрешения обскуры), рис. 3, б. Это говорит о том, что температура кольцевых образований, оставляющих в процессе сжатия автограф в виде перпендикулярных полос внутри трубы короны, максимальна в конечной стадии сжатия. Значение температуры "горячих точек", определенной методом поглотителей, составляет 1 – 2 кэВ.

Отметим, что при взрыве проволочки $\varnothing 50$ мкм на интегральных обскуrogramмах соответствующего диапазона также возникает изображение полос внутри трубы короны, но "горячих точек" на обскуrogramмах с более жестким фильтром не наблюдается⁴. Следовательно при взрыве проволочки $\varnothing 50$ мкм существенного сжатия перегретых кольцевых образований не происходит.

В настоящее время единая точка зрения на природу образования высокотемпературных локальных плазменных образований в сильноточных разрядах отсутствует. Более того, по-видимому, в различных экспериментах эти процессы могут иметь свои особенности. Хорошо известны модели развития "перетяжки", различающиеся механизмом стабилизации конечного размера^{5, 6}. Для пинчующихся разрядов, в которых происходит разбиение токовой оболочки на нити, высказана гипотеза образования "горячих точек" в результате их смыкания⁷. Приведенные в данной работе экспериментальные данные указывают на возможность процесса, в котором горячая плазма в отдельных точках образуется в результате сжатия кольцевых образований, которые возникают первоначально в короне плазменного канала на стадии максимальной интенсивности УМР излучения.

Рассмотрим возможность возникновения в короне таких кольцевых образований. Если считать, что по ней протекает большая часть тока, то, зная температуру, из условия равенства магнитного и теплового давлений можно найти отношение токовой скорости к альфвеновской $v_t/v_A \sim (R/\delta)(\sqrt{T}/I)$, которая при подстановке численных значений дает $v_t/v_A \gtrsim 3$.

При значительном превышении токовой скорости над альфвеновской возмущение магнитного поля выражается уравнением $(\partial H_\phi / \partial t) + AH(\partial H_\phi / \partial z) = 0$, которое описывает опрокидывающиеся волны^{8–11}. Этот процесс имеет характерный временной масштаб $\tau \sim (\lambda/v_A)$ (λ – длина волны возмущения), что дает при $\lambda \sim R$ $\tau \sim 10^{-9}$ с. Стабилизация опрокидывания может обеспечиваться конечной проводимостью. Таким образом в пинчах с большой токовой скоростью ($v_t > v_A$) в скин-слое стадии образования перетяжек может предшествовать стадия образования кольцевых токовых слоев, в которых ток направлен по r и Z , что, по нашему мнению, и наблюдается в описанных здесь экспериментах.

В заключение приносим благодарность Л.И.Рудакову и В.П.Смирнову за проявленный интерес к работе, В.В.Янькову за очень полезные обсуждения данной работы.

Литература

1. Mosher D., Stephanakis S.J., Vitkovitsky I.M., Dozier C.M., Levine L.S., Nagel D. Appl. Phys. Lett., 1973, 23, 429.
2. Аранчук Л.Е., Айвазов И.К., Боголюбский С.Л., Волков Г.С., Зайдель И.Н., Переводчикова Г.И. ПТЭ, 1983, 1, 157.
3. Аранчук Л.Е., Боголюбский С.Л., Волков Г.С., Иванов М.И., Козлов О.В., Пастухов М.Г. Препринт ИАЭ-3766/14, Москва, 1983.
4. Айвазов И.К., Аранчук Л.Е., Боголюбский С.Л., Вихарев В.Д., Волков Г.С., Тезисы докладов 3-й Межд. конф. "Мегагаусс", Новосибирск, 13 – 17 июня 1983, 83.
5. Вихарев В.В., Брагинский С.И. Сб. "Вопросы теории плазмы", М.: Атомиздат 1980, 10, 251.
6. Чернов А.А., Яньков В.В. Вопросы атомной науки и техники. сер. Термоядерный синтез, 1982, 1 (9), 61.
7. Быковский Ю.А., Лагода В.Б., Облизин А.Н. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 139.

8. Брызгалов В.И., Морозов А.И. ЖЭТФ, 1965, 49, 1789.
9. Игитханов Ю.Л., Каюмцев Б.Б. Препринт ИАЭ-1950, Москва, 1970.
10. Чернов А.А., Яньков В.В. Физика плазмы, 1982, 8, 931.
11. Кингсеп А.С., Рудаков Л.И., Чукбар К.В. ДАН СССР, 1982, 262, 1131.

Поступила в редакцию
28 декабря 1984 г