

## ВСПЫШКА ИЗЛУЧЕНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ТОКОВОМ СЛОЕ

*Н.П.Кирий, В.С.Марков, А.Г.Франк*

Впервые из плазмы токового слоя (ТС) зарегистрированы вспышки излучения в спектральных линиях многозарядных ионов, обнаружено возбуждение неравновесных электрических полей, определены температуры электронов и ионов плазмы ТС.

1. Определение параметров плазмы на различных этапах эволюции токовых слоев (ТС) представляется одной из существенных задач, связанных с исследованиями магнитного пересоединения. Отметим лишь, что, как показано Сыроватским<sup>1</sup>, тепловой режим токового слоя, развивающегося в атмосфере Солнца, может определять срыв метастабильной стадии и переход к взрывному разрушению слоя, т. е. инициировать импульсную фазу солнечной вспышки.

В экспериментах с плоскими ТС, в которых изучались процессы магнитного пересоединения<sup>2</sup>, главное внимание до сих пор уделялось структуре магнитных полей, распределениям электрических токов и концентрации плазмы на последовательных фазах эволюции ТС. Температура  $T_e + T_i/Z_i$  оценивалась из баланса давлений на квазистационарной стадии<sup>3</sup>. Показано, что температура ионов постепенно возрастает<sup>4</sup>, что приводит к нарушению баланса давлений во время импульсной фазы магнитного пересоединения. Уменьшение проводимости плазмы<sup>5</sup> указывало на возможное возбуждение в плазме ТС турбулентных электрических полей.

В настоящей работе эволюции температур электронов и ионов были исследованы методами спектроскопии. Обнаружено резкое возрастание обеих температур и возбуждение неравновесных электрических полей непосредственно перед импульсной фазой магнитного пересоединения.

2. Формирование плоского ТС осуществлялось с помощью прямого разряда, электрический ток которого был направлен вдоль нулевой линии двумерного квазистационарного магнитного поля<sup>2,5</sup>. Градиент квадрупольного магнитного поля  $h = 540$  Гс/см, начальная плазма с концентрацией  $N_0 \sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup> создавалась в гелии при давлении  $p_0 = 5 \cdot 10^{-2}$  торр. Ток достигал максимального значения  $J_m \approx 50$  кА к моменту  $t_m = 1.4$  мкс.

Спектральный анализ излучения плазмы ТС осуществлялся с помощью двухканальной оптической схемы. Полупрозрачное зеркало разводило излучение плазмы на два идентичных канала, в каждом из которых светосильный ахроматический объектив отображал центральную область вакуумной камеры диаметром  $\sim 2$  см и длиной 40 см на пучок кварцевых световодов. Уменьшенное изображение центральной части ТС передавалось на входные щели монохроматоров, затем излучение регистрировалось с помощью фотоумножителей и осциллографа. При изучении временной динамики интенсивностей спектральных линий щели монохроматоров составляли  $3 - 7$  Å, и при записи контуров  $0,4 - 0,9$  Å.

Изменения во времени оптических характеристик плазмы сопоставлялись с сигналами магнитного зонда, расположенного у поверхности ТС в его середине и регистрировавшего тангенциальную к слою компоненту поля  $B_x(t)$ . Начало импульсной фазы магнитного пересоединения идентифицируется по излому на кривой  $B_x(t)$  ( $t \approx 1,6$  мкс), что соответствует уменьшению тангенциальной к поверхности ТС компоненты поля<sup>2,5</sup>.

3. Как видно из рис. 1 и рис. 2, излучение из центральной области ТС в линиях однозарядных ионов примесей СII, NII, OII появляется с задержкой  $0,4 - 0,5$  мкс относительно нача-

ла тока в плазме  $J$ , в течение первой микросекунды появляются линии двухзарядных ионов CII, NIII, OIII. В интервале 1,0 – 1,5 мкс происходит медленное разгорание спектральных

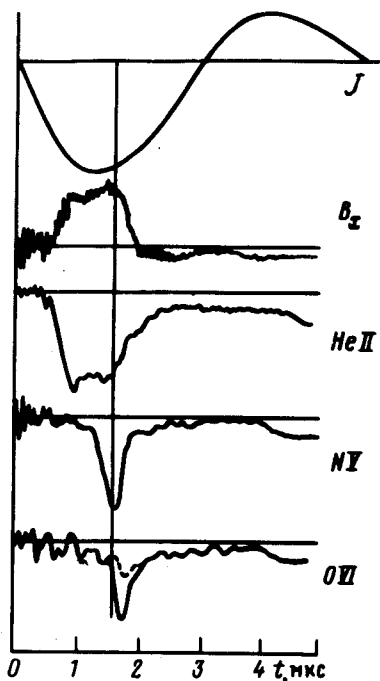


Рис. 1. Эволюция свечения плазмы ТС в различных спектральных линиях.  $J$  – ток плазмы,  $B_x(t)$  – тангенциальная к поверхности слоя компонента магнитного поля, HeII 4685,7, NV 4619,98, OVI 5290,6 Å

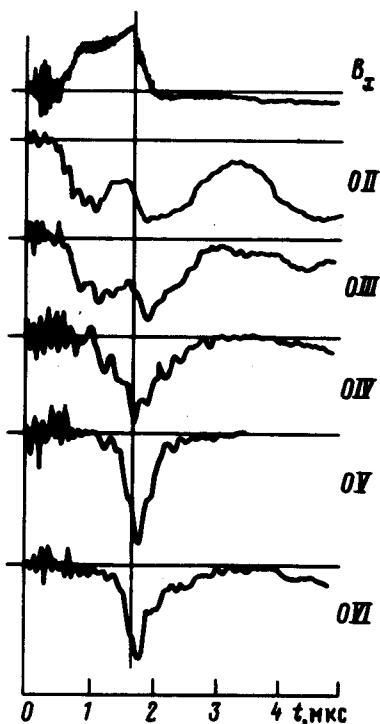


Рис. 2

Рис. 2. Эволюция свечения плазмы в спектральных линиях кислородного ряда: OII 4649,14, OIII 5592,37, OIV 4798,24, OY 5597,91, OVI 5290,6 Å

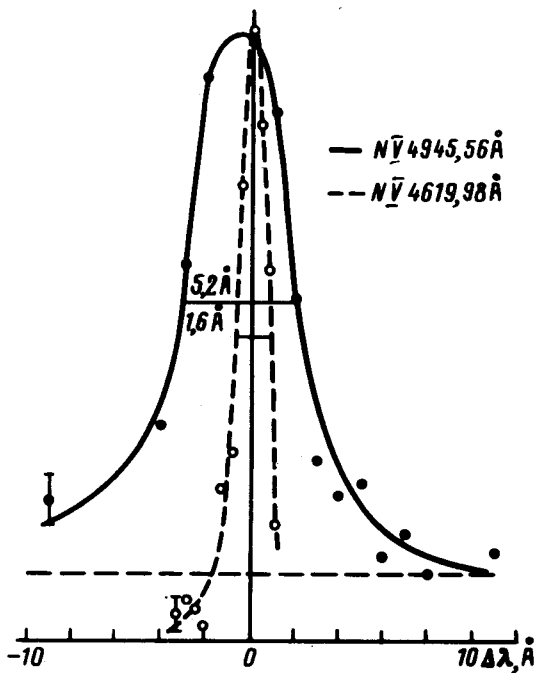


Рис. 3

Рис. 3. Профили спектральных линий четырехзарядного иона азота, NV 4619,98 и NV 4944,56 Å при  $t = 1,7$  мкс

линий CIV, NIV, OIV, а затем, при  $t = 1,3 - 1,8$  мкс — кратковременные вспышки излучения в линиях NV, OV, OVI с характерным временем нарастания  $\beta, 2 - 0,1$  мкс и длительностью  $0,4 - 0,2$  мкс. Спектральные линии более низких степеней ионизации при этом частично выгорают, а максимумы интенсивности излучения в линиях NV, OV, OVI коррелируют с быстрым спадом как интенсивности свечения в линии HeII 4685,7 Å, так и тангенциальной компоненты магнитного поля,  $B_x(t)$ .

Вспышки излучения в линиях многозарядных ионов свидетельствуют о резком возрастании температуры электронов в ТС. Для оценок  $T_e(t)$  характерные времена разгорания различных спектральных линий сопоставлялись с рассчитанными временами ионизации (возбуждения) соответствующего иона,  $\tau_i = [N_e \langle \sigma_i v_e \rangle]^{-1}$ . В интервале  $1,0 - 2,0$  мкс концентрация электронов изменяется медленно и составляет  $(1,0 - 2,0) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ <sup>2, 3</sup>. Скорости ионизации (возбуждения) были рассчитаны на основании данных, приведенных в <sup>6, 7</sup>. Так, при  $t \approx 1,3$  мкс, когда происходило медленное разгорание линий OIV,  $T_e \lesssim 20$  эВ. Проводя аналогичные оценки на основании характерных времен разгорания линий OV и OVI, получаем: при  $t = 1,5$  мкс,  $T_e = 50 \pm 20$  эВ, а при  $t = 1,6$  мкс  $T_e = 100 \pm 30$  эВ.

4. На рис. 3 приведены контуры двух спектральных линий четырехзарядного иона азота: NV 4619,98 Å ( $3s^2 S - 3p^2 P^0$ ) и NV 4944,56 Å ( $6fgh - 7ghi$ ). Первая линия, уширение которой обусловлено в основном доплер-эффектом, имеет полуширину  $1,6$  Å, что соответствует температуре ионов  $T_i \approx 220 \pm 30$  эВ. Полуширина второй линии, чувствительной как к доплер-, так и к штарк-эффекту, оказалась в 3,3 раза больше,  $5,2$  Å. Обнаруженное различие не может быть объяснено вкладом в уширение линии NV 4944,56 Å межчастичных равновесных полей<sup>8</sup>, и свидетельствует о существенной роли неравновесных электрических полей на той стадии эволюции ТС, когда происходит вспышка линий многозарядных ионов. Подчеркнем, что подобные тенденции прослеживаются при сопоставлении контуров спектральных линий и других многозарядных Li-подобных ионов: OVI 3811,35 Å и OVI 5290,6 Å, а также CIV 5801,33 Å и CIV 4658,30 Å.

5. Итак, впервые из плазмы ТС зарегистрированы вспышки излучения в спектральных линиях многозарядных ионов, что свидетельствует об импульсном нагреве электронной компоненты до температуры  $T_e \sim 100$  эВ. Максимальные значения электронной и ионной температур достигаются практически одновременно, температура ионов в наиболее горячих участках плазмы  $T_i \sim 200$  эВ. Установлено, что импульсная фаза магнитного пересоединения наступает после и, по-видимому, в результате быстрого нагрева плазмы. Впервые в плазме ТС обнаружено возбуждение неравновесных электрических полей, которые приводят к значительному уширению спектральных линий многозарядных ионов, чувствительных к электрическим полям.

Авторы выражают глубокую благодарность С.Ю.Богданову и Е.А.Оксу за плодотворные обсуждения.

#### Литература

1. Сыроватский С.И. Письма в Астрон. ж., 1976, 2, 35.
2. Франк А.Г. Труды ФИАН, 1985, 160, 93.
3. Дрейден Г.В., Кирий Н.П., Марков В.С. и др. Физика плазмы, 1977, 3, 45.
4. Кирий Н.П., Марков В.С., Савченко М.М., Франк А.Г. Препринт ИОФАН № 193, 1984.
5. Богданов С.Ю., Марков В.С., Франк А.Г. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 232.
6. Kunze H.J. Phys. Rev. A, 1971, 3, 937.
7. Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М.: Наука, 1979.
8. Гуляев С.А., Шолин Г.В., Астрон. ж., 1981, 58, 1057.