

Письма в ЖЭТФ, том 16, вып. 2, стр. 68 – 72

20 июля 1972 г.

РАДИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В Z- ПИНЧЕ .

*И. Г. Персианцев, В. Д. Письменный, А. Т. Рахимов,
А. Н. Старостин*

Через два десятилетия после обнаружения жестких излучений [1] все еще не существует убедительного объяснения механизма ускорения заряженных частиц в мощных импульсных разрядах, протекающих в разреженных газах. Неоднократно предпринимавшиеся попытки дать такое объяснение (см. например, [2]) опирались на результаты экспериментальных исследований 10 – 15-летней давности, когда состояние методов диагностики быстро протекающих процессов в горячей плазме не позволяло получать информацию о ее параметрах с высоким временным и пространственным разрешением. В связи с этим представля-

ется целесообразным средствами современной диагностики выверить основные особенности явления, а также продолжить накопление экспериментальных фактов.

Одной из важных особенностей рассматриваемого явления, считающейся в литературе однозначно установленной, является вопрос о локализации области ускорения: принято считать, что оно происходит в приосевой области разряда с радиусом всего лишь в несколько миллиметров [3]. Основанием для такого заключения явились, в частности, измерения потоков быстрых электронов, выводимых из разряда через коллиматоры в аноде, расположенные по радиусу разрядной трубки [4]. Из-за слабой чувствительности детекторов (рентгеновская пленка, экранированная алюминиевой фольгой) такие измерения по неизбежности имели усредненный характер (экспозиция 10 разрядами).

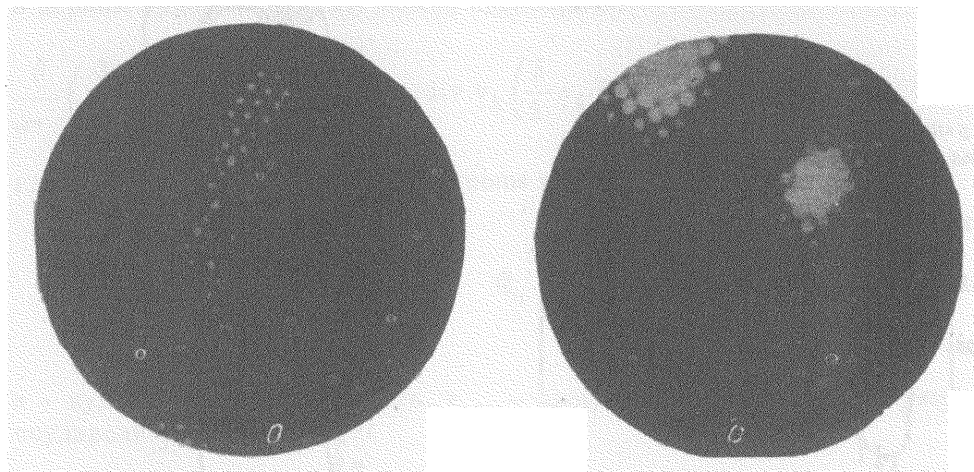


Рис. 1. Фотографии "перфорированного" анода в свете быстрых электронов.

В наших экспериментах использовалась установка, аналогичная [4]. Режим работы: $C = 60 \text{ мкф}$, $V_0 = 40 \text{ кВ}$, $I_{\text{max}} = 500 \text{ кА}$, длительность периода $\sim 20 \text{ мксек}$, рабочий газ — водород, с начальным давлением $3 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$, очищенный пропусканием через палладиевый фильтр. Внутренний диаметр алундовой камеры — 20 см , длина — 80 см .

В первом полупериоде анодом является медный электрод толщиной $1,5 \text{ мм}$, центральная часть которого диаметром 80 мм представляла собой "сито", образованное регулярно и густо расположенными отверстиями диаметром $1,5 \text{ мм}$. Непосредственно за анодом располагался экран толщиной 1 мм из оргстекла, покрытый тонкой пленкой терфина и защищенный от видимого излучения плазмы и электронов с энергией ниже 100 кэВ алюминиевой фольгой толщиной 45 мк . Свечение экрана одновременно регистрировалось с помощью фотоаппарата и ЭОП'а ЛВ-01, позволяющего получать многокадровую съемку с минимальной экспозицией в 50 нсек . Применение трансформатора изображения на основе волоконной оптики, способного трансформировать плоскую картину свечения в линию и восстанавливать исходную картину, позволило использовать ЛВ-01 в режиме фоторегистратора для

изучения временного хода интенсивности свечения экрана с разрешением не хуже 10 нсек .

Эксперименты показали следующее:

1. Генерация быстрых (более 100 кэв) электронов: а) наблюдается лишь после серии "тренировочных" разрядов и отсутствует при малейшем загрязнении газа, б) возникает в момент последней из серии "особенностей" на токе (их число составляло 3 – 4); в) длится в течение от 60 до 150 нсек ; г) возникает и прекращается одновременно во всех областях эмиссии (с точностью $\sim 10 \text{ нсек}$).

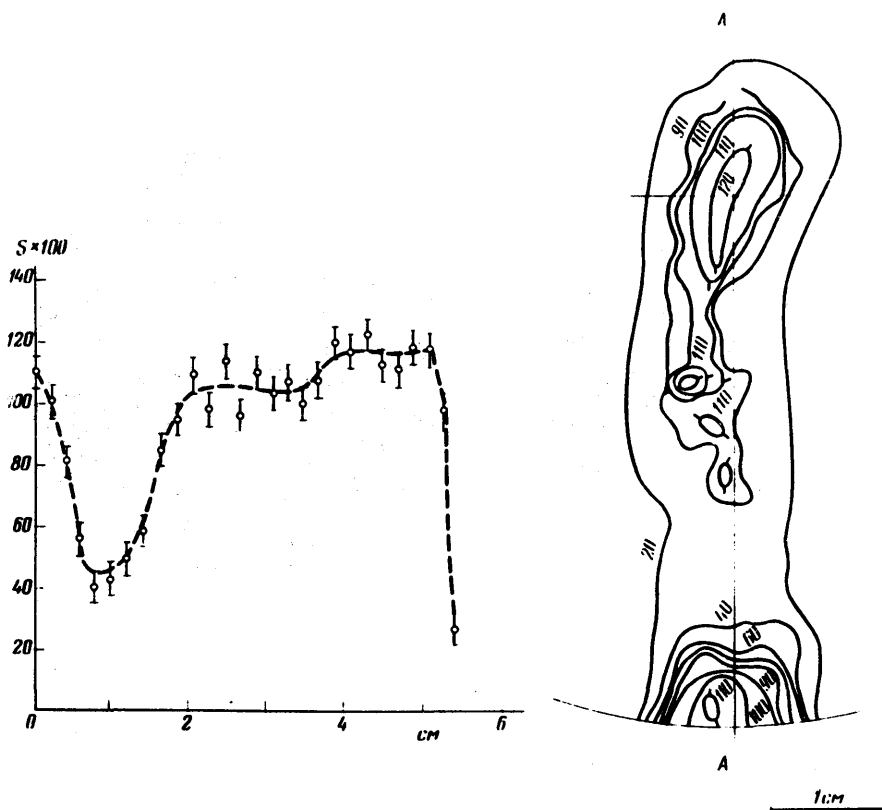


Рис. 2. Микрофотограммы по А-А и карты линий равных почернений для случаев а и б, рис. 1

2. Распределение быстрых электронов по сечению разрядной камеры: а) отличается большим многообразием и индивидуально для каждого разряда (рис. 1); б) занимает площадь от долей до нескольких см^2 ; в) имеет, как правило, примерно одинаковую интенсивность в пределах каждой отчетливо выделенной зоны инжекции.

Последний вывод иллюстрируется рис. 2, где представлен результат микрофотометрической обработки случая а) рис. 1.

Таким образом, радиальное распределение быстрых электронов Z-пинча представляет собой сложную картину, по-видимому, отражающую нестабильность токового шнура в момент последней "особенности", наступавшей в условиях наших экспериментов через $2,0 - 2,3 \text{ мксек}$

после начала разряда. Эту картину трудно понять с точки зрения об- суждавшихся в литературе механизмов ускорения, в том числе и пред- лагаемого в недавней работе [5].

В качестве возможного объяснения описанных явлений рассмотрим механизм перегретой неустойчивости, аналогичный развитому в [6]. Инкремент неустойчивости в условиях пинча максимален в момент выравнивания температур электронов и ионов ($\sim 100 \text{ эВ}$), что осуществ- ляется, по-видимому, в последней "особенности" тока. Эта неустойчи- вость может приводить к разбиению пинча на токовые нити, что сопро- вождается образованием большого числа нулевых линий магнитного поля. Для оценок напомним нестационарные уравнения баланса энергии и непрерывности для электронов и ионов в стадии кумуляции (в этой стадии давление магнитного поля не превосходит газокINETическое и, в первом приближении, им можно пренебречь):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_k T_k + \frac{n_k m_k v_k^2}{2} \right) + \text{div } v_k \left(\frac{5}{2} n_k T_k + \frac{n_k m_k v_k^2}{2} \right) = Q_k, \quad (1)$$

где $k = e, i$ характеризует электроны и ионы соответственно,

$$Q_e = \sigma E^2 - \frac{2m}{M} \frac{n_e (T_e - T_i)}{\tau_{ei}}; \quad Q_i = \frac{2m}{M} \frac{n_e (T_e - T_i)}{\tau_{ei}}; \quad n_e = n_i = n$$

σ — кулоновская проводимость, τ_{ei} — время между электрон-ионными соударениями $\sim 10^{-10} \text{ сек}$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div } n v = 0 \quad (2)$$

При записи (1) предполагалось, что размер токовой нити больше харак-

терного размера кулоновской теплопроводности $L \gg \sqrt{\frac{\chi}{(\Omega \tau)^2} \frac{1}{\gamma} \left(\frac{M}{m} \right)^{1/2}}$;

$\chi \sim \ell v_{Te}$, ℓ — длина пробега, v_{Te} — тепловая скорость электронов, Ω — их циклотронная частота, γ — инкремент рассматриваемой неустой- чивости. Как показывают оценки, потерями энергии на излучение в слу- чае чистой водородной плазмы можно пренебречь. При наличии загряз- нений пинча перегретая неустойчивость может не развиваться из-за роста мощности линейчатого излучения примесей с температурой. Кро- ме того, будем рассматривать такие возмущения, размер которых удов- летворяет условию $L \ll (1/\gamma) \sqrt{T_e/M}$, благодаря чему суммарное дав- ление плазмы в нити остается постоянным. В результате, аналогично [6], получим уравнение

$$\frac{\partial n}{\partial t} = - \frac{2}{5} \frac{n}{p} \sigma E^2 \quad (3)$$

где $\sigma = \sigma_1 T^{3/2}$, $\rho = 2Tn$, решение которого имеет вид

$$T(t) = T(0) \left(1 - \frac{3}{5} \frac{\sigma_0 E^2}{\rho} t \right)^{-2/3} \quad (4)$$

Из (4) следует, что инкремент $\gamma \sim \sigma_0 E^2 / \rho$, и для условий эксперимента по порядку величины $\gamma \sim 10^7 - 10^8 \text{ сек}^{-1}$, а характерный размер токовой нити, удовлетворяющий наложенным ограничениям, $L \sim 10^{-2} \text{ см}$.
Времена перестройки магнитного поля $\tau \sim (4\pi\sigma L^2 / c^2) \sim (1/\gamma)$.

Оценив индуцированное электрическое поле, связанное с образованием токовых нитей и появлением нулевых линий магнитного поля $E \sim \gamma(Hr/c)$, где r удовлетворяет условию $L \ll r \lesssim R_0$ (R_0 — радиус пинча $\sim 1 \text{ см}$), $H \sim 10^5 \text{ э}$, получаем $E \sim 10^4 - 10^5 \text{ в/см}$. Возникновение индукционных полей такого порядка величины и образование большого числа перегретых нитей и нулевых линий магнитного поля может служить объяснением описанных выше экспериментальных явлений.

Авторы благодарны Л.А.Арцимовичу, А.А.Веденову и Е.П.Велихову за поддержку работы и неоднократные обсуждения, а также А.А.Семенову и М.А.Тимофееву за помощь в проведении экспериментов.

Институт ядерной физики
Московского
государственного университета
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
2 июня 1972 г.

Литература

- [1] Л.А.Арцимович, А.М.Андриянов, Е.И.Доброхотов, С.Ю.Лукьянов, И.М.Подгорный, В.И.Синицын, Н.В.Филиппов, АЭ, 3, 84, 1956.
- [2] М.Д.Райзер, В.Н.Цытович, АЭ, 14, 249, 1963.
- [3] Л.А.Арцимович. Управляемые термоядерные реакции, М., Физматгиз, 1963.
- [4] Н.Г.Ковальский, И.М.Подгорный, М.М.Степаненко, ЖЭТФ, 38, 1439, 1960.
- [5] И.Ф.Кварцхава, Ю.В.Матвеев, Н.Г.Решетняк, Письма в ЖЭТФ, 15, 619, 1972.
- [6] Е.П.Велихов, И.В.Новобранцев, В.Д.Письменный, А.Т.Рахимов, А.Н.Старостин, ДАН СССР, 205, 1972.