

НАБЛЮДЕНИЕ ВТОРОГО СЖАТИЯ В КОНЕЧНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА ТИПА "ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС"

В. А. Грибков, В. М. Коржавин, О. Н. Крохин, Г. В. Склизков,
Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова

1. Повышенный интерес, проявляемый в последнее время к термоядерным установкам со сверхплотной плазмой типа плазменного фокуса, Θ -пинча, лазерной плазмы и др., обусловлен рекордными цифрами, получаемыми на этих установках по достижению критерия Лоусона. В разрядах "плазменный фокус" кроме того зафиксированы еще и рекордные нейтронные выходы [1, 2] при значительной доле нейтронов теплового происхождения [2,3] и высокой электронной и ионной температурах.

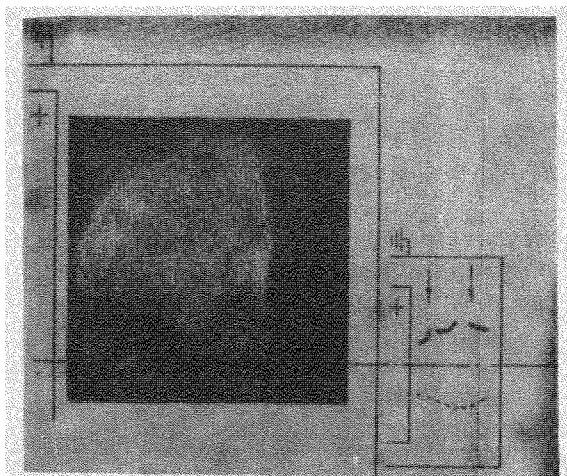


Рис. 1. Интерферограмма ПФ, полученная в момент разрыва токовой оболочки, который совпадает с началом импульса жесткого рентгеновского излучения. Вверху приведен схематический рисунок интерферограммы. Стрелки указывают места прорывов токовой оболочки

Многочисленные исследования кумулятивной стадии этого разряда (обозначаемой в дальнейшем ПФ), позволили изучить экспериментально и удовлетворительно описать теоретически [4, 5] начальную фазу развития ПФ, так называемое "первое сжатие", отличающееся относительно небольшим нейтронным выходом, вспышкой мягкого рентгена, плотностью, достигающей до 10^{20} см^{-3} и температурой $T_e \sim T_i \sim 2 + 5 \text{ кэВ}$ а также характерным явлением вытекания значительной части массы вдоль оси z из области фокуса, благодаря чему и достигается высокая температура. Сведения же о конечной фазе развития ПФ весьма скудны и практически ограничиваются исследованиями нейтронной эмиссии и жесткого рентгеновского излучения.

В настоящей работе приводятся результаты скоростного интерферометрического исследования этой конечной стадии ПФ, проведенного на установке, описанной в работе [1]. Методика исследования аналогична ранее использованной для исследования лазерной плазмы [6].

2. Ранее было установлено, что на промежуточной между первым и вторым сжатиями стадии на поверхности ПФ развиваются коротковолновые неустойчивости нулевого порядка [4, 7]. Как показали наши исследования, в дальнейшем токовая оболочка претерпевает разрывы, причем не в "шейке" перетяжки, как это предсказывалось в работе [8] (рис. 1). Через образовавшиеся разрывы плазма начинает вытекать из области сжатия дополнительно уменьшая количество частиц в ПФ. При этом сохранившиеся части токовой оболочки продолжают сходиться к оси. Момент разрыва совпадает с максимумом импульса жесткого рентгеновского излучения (передний фронт которого, в нашем случае был порядка времени разрешения фотоумножителя) и слабым пиком нейтронного излучения. Данные результаты указывают на более сложный механизм образования жесткого рентгеновского излучения по сравнению с предложенными в теоретических работах [8, 9]

3. Типичная интерферограмма, относящаяся ко второму сжатию, т. е. к моменту времени вблизи максимума основного нейтронного импульса, снятая с экспозицией ~ 1 *мсек*, и ее обработка приведены на рис. 2, а, б соответственно. Из рисунка видно, что длина и радиус ПФ в момент второго сжатия существенно уменьшились, а ось его искривлена и наклонена к оси системы. Это подтверждает высказанное в [4] предположение, что хаотически изменяющиеся короткие следы на обскурдиограммах, снятых в мягком рентгене, относятся ко второму сжатию.

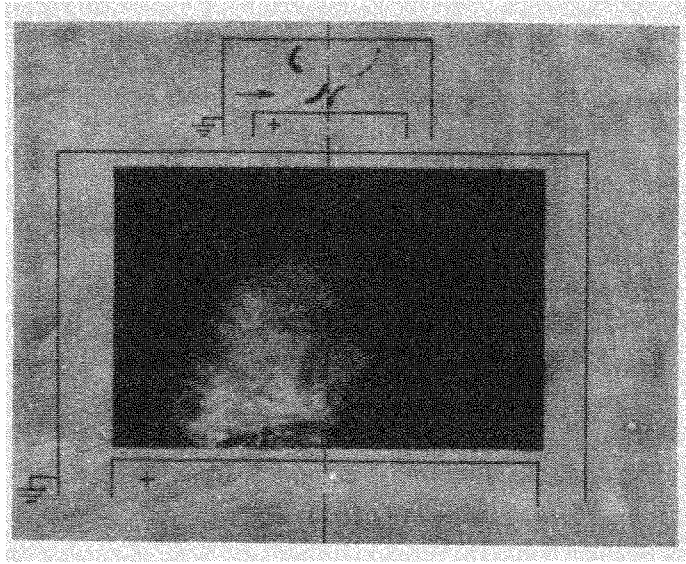
Исследование большого количества интерферограмм показало, что такое вторичное "дожатие" токовой оболочки может происходить в различных местах и даже сразу в нескольких местах на одном ПФ через интервалы времени порядка десятков *мсек*. В областях ниже таких дожати в момент максимума нейтронного импульса происходит очень сильное размазывание интерференционных полос с весьма хаотическими обрывами и искривлениями, что, по-видимому, свидетельствует о турбулентности плазмы в этой части ПФ,

Из рис. 2, б видно, что градиент электронной плотности на границе ПФ в этот момент времени резко уменьшается. Это говорит о существенно большей глубине проникновения магнитного поля в плазму по сравнению с моментом времени, соответствующим первому сжатию что качественно подтверждает теоретический расчет в [4].

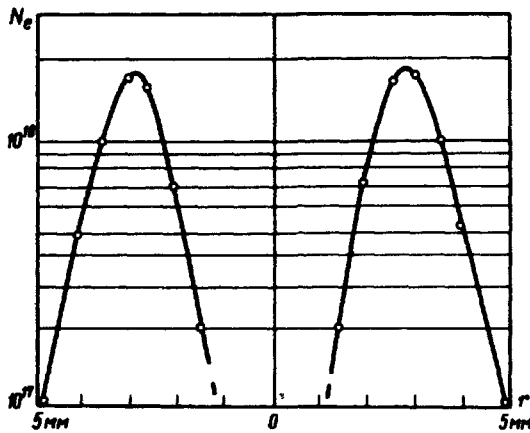
4. В центре сжатой плазмы и особенно на границе "дожати" и турбулентных областей видны вытянутые вдоль оси z образования с резкими градиентами, полностью смазанными интерференционными полосами и поперечными размерами, превышающими размер разрешаемого элемента. Этот факт свидетельствует о существенной роли в нагреве плазмы во втором сжатии механизма, связанного с турбулентностью, вызываемой пучковой неустойчивостью [10], которая возбуждается электронами, ускоренными в электрических полях, возникающих при разрывах токовой оболочки.

Оценки нейтронного выхода, сделанные для области второго сжатия при параметрах $T_i \sim 20$ *кэв* [3], $\tau \sim 10$ *нсек*, $N_e \sim 10^{18}$ *см⁻³* оказываются в хорошем согласии с экспериментом ($\sim 10^{10}$ нейтронов). Оценки же нейтронного выхода для области разрыва токовой оболочки за то же

время при той же температуре, но при плотности $N_e \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (которая существует здесь до развития турбулентности) дают величину на 2 порядка меньшую. Объемы плазмы, подставляемые в эти оценки, брались из интерферограмм.



а



б

Рис. 2, а, б. Интерферограмма второго сжатия и ее обработка, относящиеся к моменту времени до окончательного дожатия, полного развития турбулентности и максимума нейтронного импульса приблизительно за 20 нсек. Стрелкой на схеме указана область второго сжатия. Из обработки видна трубчатость структуры пинча в этот момент времени

Таким образом, полученные результаты демонстрируют факт разрывов токовой оболочки ПФ в момент максимума импульса жесткого рентгеновского излучения, последующее дожатие сохранившихся частей оболочки, развитие турбулентности в месте разрушения ее, устанавливая дополнительный механизм вытекания плазмы из оболочки, который объясняет ранее непонятный недостаточно большой нейтронный выход ПФ при предполагаемой температуре $\sim 20 \text{ кэВ}$, и указывают на существенное проникновение магнитного поля в плазму разряда в этот

момент времени. Подробное обсуждение полученных результатов будет дано в отдельной статье.

Авторы благодарны академикам Л.А.Арцимовичу и Н.Г.Басову за поддержку работы, М.П.Моисеевой и В.Я.Никулину за помощь в эксперименте.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
9 февраля 1972 г.

Литература

- [1] Н.В.Филиппов и др. Nuclear Fusion, Supplement, part2, 577, 1962.
 - [2] Ch.Maisonier et al. Доклад на IV конференции по исследованиям в области физики плазмы и управляемых термоядерных реакций, IAEA/CN-28/D-1, D-2, Madison, Wisconsin, USA, 1971.
 - [3] H.Conrads, P.Cloth, M.Demmeler, R.Hecker. To be published in "Phys. Fluids", 1972.
 - [4] Н.В.Филиппов и др. Доклад на IV конференции по ФП и УТР, IAEA/CN-28/D-6, Madison, Wisconsin, USA, 1971.
 - [5] D.E.Potter. Phys. Fluids.,14, 1911, 1971.
 - [6] Н.Г.Басов, В.А.Грибков, О.Н.Крохин, Г.В.Склизков. ЖЭТФ, 54, 4, 1968.
 - [7] N.J.Peacock et al. Доклад на IV конференции по ФП и УТР, IAEA/CN-28/D-3, Madison, Wisconsin, USA, 1971.
 - [8] Б.А. Трубников. ФП, и ПУТР, 4, 87, 1958.
 - [9] O.A.Anderson, W.R.Baker, S.A.Colgate et al. Доклад на III Международной конференции по газовому разряду. Венеция, 1957.
 - [10] D.A.Freiwald et al Phys. Lett., 36A, 297, 1971.
-