

РЕГИСТРАЦИЯ "ХОЛОДНОГО ЯДРА" В Z-ПИНЧЕ, ОБРАЗОВАННОМ ПРИ ВЗРЫВЕ ПРОВОЛОЧКИ

Г.С.Саркисов, Б.Этлишер*¹⁾, С.Ателан*¹⁾, К.Руйе*¹⁾

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН
117924 Москва, Россия

*LPMI, Laboratoire du CNRS, Ecole Polytechnique
91128 Palaiseau, France

Поступила в редакцию 22 февраля 1995 г.

Доказано существование "холодного ядра" в плазме быстрого сильноточного Z-пинча, образованного при взрыве тонкой проволоки. Результаты получены при зондировании плазмы 3нс лазерным импульсом на длине волны 532нм. Эксперименты производились на сильноточном генераторе тока с длительностью импульса ~ 50 нс и максимальной величиной тока ~ 250 кА. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что основная часть проволоки остается не испаренной практически в течение всего первого полупериода импульса тока.

Исследование Z-пинчей, образованных при взрыве проволоки, используемой в качестве нагрузки сильноточного генератора тока, представляет большой интерес в связи с работами по управляемому термоядерному синтезу, созданию яркого источника рентгеновского излучения, а также в связи с изучением возможности создания рентгеновского лазера. Впервые предположение о том, что в процессе взрыва 20мкм медной проволоки и протекания тока через образовавшуюся плазму значительная часть проволоки может оставаться не испаренной, было высказано в работе [1]. Такой вывод был сделан в результате анализа интегральных обскурограмм и отсутствия заметной связи между мощностью и энергией излучения от диаметра проволоки, что свидетельствовало о том, что разряд использует малую часть начальной массы вещества. Было установлено, что ток протекает по внешней разреженной и относительно горячей части пинча составляющей малую долю его линейной массы, при этом внутренняя часть пинча остается плотной и относительно холодной [2]. В теоретической работе [3] было показано, что при учете теплопроводности плазмы возможно существование в Z-пинче равновесного гетерогенного состояния с плотной холодной сердцевиной и разреженной горячей короной, образованной малой долей погонной массы, по которой протекает почти весь ток.

В то же время, следует отметить работу [4], в которой утверждается, что при взрыве 25мкм алюминиевой проволоки в плазменную корону переходит более 50% начальной массы вещества. Данные получены в результате экспериментов по проекционному рентгеновскому просвечиванию плазмы взрывающейся проволоки с помощью X-пинча. Параллельно проводилось теневое фотографирование внешней границы плазмы в свете азотного лазера ($\lambda = 337$ нм), показавшее, что граница плазмы подвержена значительной неустойчивости типа $m = 0$. При этом рентгеновское зондирование показало наличие устойчивого и плотного плазменного ядра диаметром 200–300мкм, непрозрачного для излучения в диапазоне 4–5кэВ. Таким образом, вопрос

¹⁾В.Этлишер, С.Ателан, С.Руйе

о наличии неиспаренной части проволоочки в процессе пинчевания остался открытым.

Как известно, проникновению зондирующего лазерного излучения вглубь Z -пинча препятствуют три основных явления: рефракция излучения на поперечных градиентах электронной плотности, отражение света от критической поверхности электронов (когда частота лазера сравнивается с плазменной частотой), а также его абсорбция в плазме. Наиболее распространенным является представление о доминирующей роли рефракции, то есть лазерное излучение при прохождении через плазму претерпевает значительное отклонение от первоначального направления распространения из-за больших радиальных градиентов электронной плотности и не попадает в приемный угол регистрирующей оптической системы. При этом на изображениях пинча возникает непрозрачная область плазмы, значительно ограничивая тем самым информативность лазерной диагностики. Очевидно, что при увеличении угловой апертуры системы регистрации рефракционные ограничения уменьшаются. Для отражения электромагнитной волны видимого диапазона от критической поверхности электронов, необходимо чтобы плотность электронов превышала величину $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$, что, по-видимому, может быть достигнуто только в области перетяжки в течение короткого промежутка времени. Коэффициент абсорбции плазмы растет с увеличением электронной плотности и с уменьшением ее температуры. Проведенное нами зондирование плазмы Z -пинча, образованного при взрыве проволоочки, с использованием лазерного излучения на длине волны 532 нм и при угловой апертуре оптической системы регистрации $\sim 0,2$ рад показали, что ограничения связанные с отражением зондирующего излучения от критической поверхности электронов а так же с его большой рефракцией (в нашем случае более 0,1 рад), отсутствуют, и существенным оказывается только поглощение света плазмой.

Эксперимент проводился на сильноточном генераторе тока GAEL с водяной формирующей линией (Ecole Polytechnique) [5] с параметрами: максимальная сила тока 250 кА, длительность импульса по полувысоте 50 нс, напряжение 0,5 МВ, мощность 0,1 ТВт. В качестве нагрузки использовали медную проволоочку диаметром 20 мкм, помещенную в промежуток между катодом и анодом установки, равным 10 мм.

Для зондирования плазмы мы использовали мощный Nd:YAG-лазер (QUANTEL NG-24) с активной модуляцией добротности. Выходная энергия лазера, состоящего из трехнаносекундного генератора и трех усилителей, составляла 1 Дж. Для зондирования плазмы использовали вторую гармонику лазера, получаемую в результате нелинейного преобразования излучения в KDP-кристалле с коэффициентом преобразования 25%. Таким образом, зондирующее излучение имело следующие параметры: длина волны 532 нм, длительность импульса 3 нс и энергия 250 мДж. Разброс в синхронизации лазерного излучения с импульсом тока установки GAEL не превышал 5 нс.

Исследование плазмы производилось при помощи трехканального диагностического комплекса, позволяющего получать одновременно теневое, шлирен и интерференционное изображения плазмы. Угловая апертура оптической системы составляла $\sim 0,2$ рад, пространственное разрешение ~ 20 мкм. Для устранения влияния собственного свечения плазмы использовали пространственную и частотную фильтрации излучения. Для пространственной фильтрации использовали узкую ~ 1 мм щель, ориентированную перпендикулярно к осц

Z-пинча. Это позволяло значительно уменьшить уровень собственного свечения плазмы (поскольку плазма излучает в телесный угол 4π) и пропустить к фотоприемнику зондирующее излучение, не претерпевшее рефракцию, а также рефрагировавшее в направлении, перпендикулярном к оси симметрии пинча, вдоль которого ориентированы макроскопические градиенты электронной плотности. Частотная фильтрация производилась при помощи интерференционных фильтров, расположенных перед фотоприемником. В качестве фотоприемников использовались CCD-камеры (Philips NXA1050/05 576×604 с волоконно-оптическим входом), откалиброванные при помощи ступенчатого ослабителя в свете зондирующего лазера. Подробное описание оптической схемы эксперимента приведено в работе [6].

На рис.1 приведено абсорбционное изображение Z-пинча, образованного при взрыве 20 мкм медной проволоочки при протекании 200 кА тока. В момент зондирования плазмы было зарегистрировано начало рентгеновского излучения из плазмы. Абсорбционное изображение представляет собой обычное теневое изображение плазмы, полученное при уменьшении в несколько раз нейтральных фильтров перед фотоприемником. При этом область изображения на CCD-камере, где лазерный пучок не претерпел абсорбции, находится в насыщении, а центральная область пинча (не прозрачная при обычном теневом фотографировании) оказывается прозрачной для зеленого света. Вдоль оси абсорбтограммы видна тень от неиспарившейся проволоочки. Отметим, что при достаточно большом динамическом диапазоне фотоприемника можно производить одновременную регистрацию теневого и абсорбционного изображений плазмы на одном и том же детекторе. Однако поскольку в нашем случае внешний вид абсорбционного изображения плазмы существенно отличается от теневого, то в дальнейшем мы будем использовать для такого типа изображений термин "абсорбтограмма".

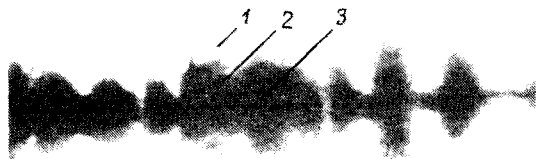


Рис.1. Абсорбтограмма Z-пинча, образованного при взрыве 20 мкм медной проволоочки в момент начала рентгеновского излучения: 1 – область насыщения сигнала на CCD-детекторе; 2 – область абсорбции света; 3 – тень от неиспарившейся проволоочки

На рис.2 представлена инвертированная поверхность распределения относительной интенсивности лазерного излучения на абсорбтограмме. Вдоль оси пинча виден след от неиспарившейся проволоочки. Радиальные сечения поверхности соответствуют распределению интегрального коэффициента поглощения лазерного излучения. Измерения показали, что в условиях наших экспериментов поглощение света в плазме уменьшает его интенсивность примерно в 10–20 раз.

На рис.3 представлен ряд из четырех абсорбтограмм Z-пинча 20 мкм медных проволоочек, полученные в различных выстрелах и соответствующие различным моментам зондирования – от -7 нс до $+10$ нс по отношению к началу рентгеновского излучения. Во всех четырех случаях видно изображение неиспарившейся проволоочки. До начала рентгеновского излучения плазма стремится принять аксиально симметричную форму, происходит образование перетяжек и выбросов. После начала рентгеновского излучения наблюдается нарушение симметрии Z-пинча и возникновение радиальных разрывов в плазме.

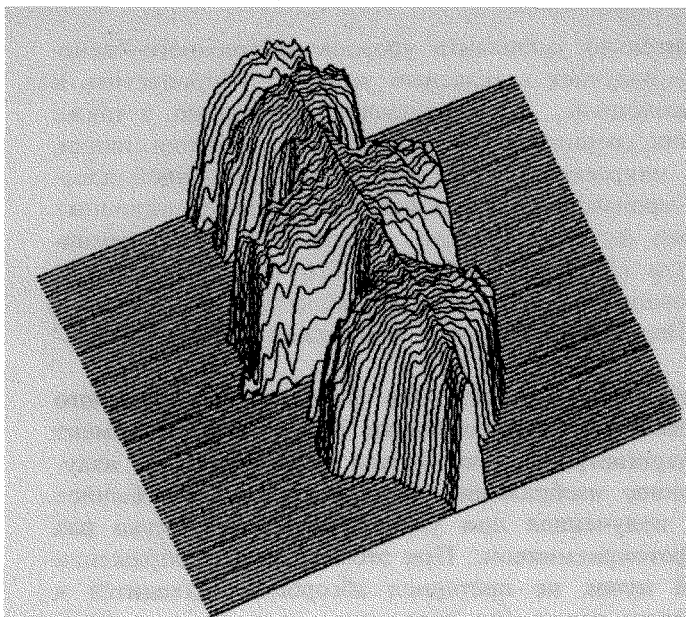


Рис.2. Инвертированная поверхность распределения интенсивности лазерного излучения, претерпевшего поглощение в Z-панче

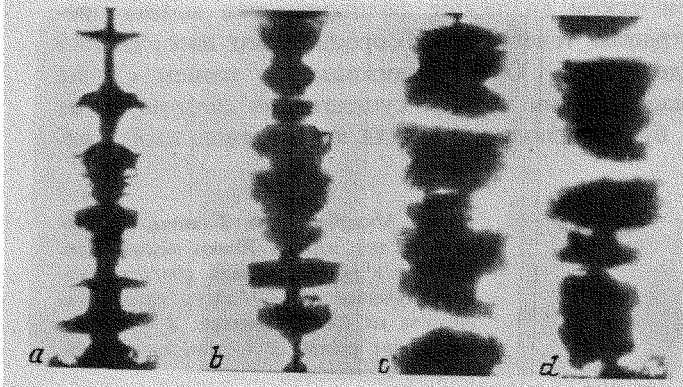


Рис.3. Абсорбogramмы Z-пинча, образованного при взрыве 20 мкм медной проволоочки, полученные в различных выстрелах и соответствующие различным временам зондирования по отношению к началу рентгеновского излучения: a - 7нс; b - 0нс; c - +5нс; d - +10нс

Простые оценки показывают, что для создания плазменной короны со степенью ионизации 2–3 и средней по короне электронной плотностью $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ достаточно испарить всего лишь $\sim 1 \text{ мкм}$ вещества с поверхности проволоочки, что не превышает $\sim 3\%$ от ее массы (увеличение заряда ионов в нашей оценке приведет к уменьшению доли испаренной массы). Полное испарение вещества происходит, по-видимому, в более поздние моменты времени. Эта оценка подтверждает результаты работы [7], в которой показано, что чистота поверхности проволоочки оказывает существенное влияние на результаты экспериментов.

Таким образом, результаты нашей работы свидетельствуют о том, что в экспериментах с проволоочками плазменная оболочка возникает в результате поверхностного взрыва незначительной части начальной массы вещества. Далее ток перехватывается низкоплотной плазмой и последующая абляция проволоочки происходит за счет передачи энергии от зоны выделения джоулева тепла в токовом слое посредством электронной теплопроводности и излучения.

Полное испарение проволоочки происходит либо в местах образования перетяжек, где температура и давление резко возрастают, либо в более поздние моменты времени, не представляющие интереса для физики Z -пинчей. В процессе протекания тока через Z -пинч неиспарившаяся часть проволоочки играет роль "холодного ядра", ограничивающего рост температуры плазмы за счет того, что джоулев нагрев и излучение от токового слоя будут расходоваться на абляцию и ионизацию вещества проволоочки.

Необходимо отметить, что зондирование лазерным излучением внутренней области плазмы Z -пинча существенно расширяет возможности диагностики плотной плазмы. Так, например, шпирен изображение зоны абсорбции позволит визуализировать структуру градиентов электронной плотности внутренней области пинча. Одновременное получение абсорбограммы и интерферограммы плазмы позволит восстановить пространственное распределение электронной температуры и давления внутренней области Z -пинча.

Выполненная работа была поддержана контрактом ЕС #SC1*-CT91 0728, контрактом ETCA/CEG #420/115/01 и контрактом DRET #92/134.

-
1. Л.Е.Аранчук, С.Л.Боголюбский, Г.С.Волков и др., Физика плазмы **12**, 1324, (1986).
 2. И.К.Айвазов, Л.Е.Аранчук, С.Л.Боголюбский, Г.С.Волков, Письма в ЖЭТФ **41**, 111 (1985).
 3. Н.А.Боброва, Т.Л.Разинкова, П.В.Сасоров, Физика плазмы **14**, 1053 (1988).
 4. D.H.Kalantar and D.A.Hammer, Phys. Rev. Lett. **71**, 3806 (1993).
 5. F.Wessel, B.Etlicher, and P.Choi, Phys. Rev. Lett. **69**, 3181 (1992).
 6. G.S.Sarkisov, B.Etlicher, C.Rouille, and S.Attelan, Preprint LPMI 2987, Ecole Polytechnique (1994).
 7. А.Бартник, Г.В.Иваненков, Л.Карпински и др., Квантовая электроника **21**, 181 (1994).