

НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА ПОТЕРИ ТОКА В ПЕРЕТЯЖКЕ Z-ПИНЧА ОБРАЗОВАННОГО ПРИ ВЗРЫВЕ ПРОВОЛОЧКИ

Г.С.Саркисов, Б.Этлишер^{*1)}, С.Ателан^{*1)}, К.Руйе^{*1)}, А.С.Шиканов

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

^{*} *LPMI, Laboratoire du CNRS, Ecole Polytechnique
91128 Palaiseau, France¹⁾*

Поступила в редакцию 1 февраля 1995 г.

При исследовании плазмы Z-пинча методом фарадеевского вращения зарегистрировано резкое уменьшение тока в области перетяжки до величины, не превышающей 2% от общего тока через пинч, составляющего ~ 100 кА. Плазма образовывалась при взрыве 25 мкм Al-проволочки, используемой в качестве нагрузки сильноточного генератора тока. Результаты эксперимента радикально меняют представление о механизме образования перетяжки. Качественные черты явления находятся в согласии с электронной МГД.

Явление острой самофокусировки энергии в перетяжках Z-пинчей представляет большой интерес в связи с возможностью получения плазмы с высокими значениями температуры и плотности. Все имеющиеся до настоящего времени модели развития перетяжки подразумевают, что фокусировка энергии связана с ростом давления магнитного поля линейного тока обратно пропорционально квадрату радиуса. Однако экспериментальные данные, подтверждающие или опровергающие данный сценарий развития перетяжки в Z-пинче, в настоящее время отсутствуют. Исследование пространственного распределения магнитных полей в области перетяжки пинча позволило бы дать ответ на этот вопрос.

Наиболее информативным способом исследования пространственной структуры магнитных полей в плотной плазме является метод, основанный на использовании магнитооптического эффекта Фарадея. Фарадеевская диагностика была использована в работах по исследованию структуры магнитных полей в плазменном фокусе [1], вакуумной искре [2] и сильноточном Z-пинче, образованном при взрыве дейтерированного полиэтилена током ~ 3 МА на установке Ангара-5-1 [3]. Однако в этих работах отсутствуют данные по структуре магнитных полей в области перетяжки. Наша работа позволяет ответить на этот вопрос.

Магнитооптический эффект Фарадея заключается в повороте плоскости поляризации плоскополяризованной зондирующей электромагнитной волны при ее распространении вдоль силовых линий магнитного поля в плазме. Одновременное измерение угла поворота плоскости поляризации и интерференционного набега фазы зондирующего излучения позволяет восстановить среднюю величину проекции индукции магнитного поля вдоль линии зондирования [4]. В случае, если исследуемая плазма обладает аксиальной симметрией, возможно восстановление локального распределения магнитного поля и электронной плотности с использованием процедуры абелизации [4].

Для исследования структуры магнитных полей и электронной плотности используется принцип трехканальной поляроинтерферометрии, заключающийся

¹⁾ B.Etlicher, S.Attelan, C.Rouille

в одновременном получении фарадеевского, теневого и интерференционного изображений плазмы [4]. Совместная обработка фарадеевского и теневого изображений позволяет восстановить распределение угла поворота плоскости поляризации с учетом поглощения и рефракции зондирующего излучения. По сдвигу интерференционных линий от своего невозмущенного положения можно восстановить распределение набега фазы.

Эксперимент проводился на сильноточном генераторе тока *GAEI (Ecole Polytechnique)* с параметрами 250 кА, длительность импульса 50 нс, напряжение 0,5 МВ и мощность 0,1 ТВт. В качестве нагрузки использовали Al-проволочку диаметром 25 мкм помещенную в 10-миллиметровую промежутку между катодом и анодом установки.

Для проведения оптических измерений мы использовали мощный Nd:YAG лазер (QUANTEL NG-24) с активной модуляцией добротности. Выходная энергия лазера на основной частоте составляла 1 Дж. На выходе из лазера излучение преобразовывалось во вторую гармонику в результате нелинейного преобразования 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 *GAEI* не превышал 5 нс.

Для исследования структуры магнитных полей и электронной плотности в плазме Z-пинча был создан трехканальный поляроинтерферометр, позволяющий одновременно получать фарадеевское, теневое и интерференционное изображения плазмы. Координатное совмещение трех изображений производилось при помощи визуализирующей диафрагмы, помещенной в область промежуточного изображения плазмы. Щелевая диафрагма помещенная в фокусе первой линзы и ориентированная перпендикулярно к оси Z-пинча, позволяла устранить влияние собственного свечения плазмы на результаты измерений. При этом зондирующее излучение, не претерпевшее рефракцию, а также рефрагировавшее в плоскости, перпендикулярной к оси пинча, вдоль которой ориентированы макроскопические градиенты электронной плотности, проходило через диафрагму. Дополнительное уменьшение собственного свечения плазмы производилось также с помощью интерференционных фильтров, помещенных перед фотоприемниками. В качестве фотоприемников использовали CCD камеры, откалиброванные при помощи ступенчатого ослабителя в свете зондирующего лазера. Оптическая схема прибора и его подробное описание приведены в работе [5].

Фарадеевское, теневое и интерференционное изображения плазмы представлены на рис.1. В качестве нагрузки использовали 25 мкм Al-проволочку. Зондирование плазмы происходило во время нарастания тока, за 13 нс до начала рентгеновского излучения. Величина тока нагрузки в момент зондирования, в соответствии с данными электротехнических измерений, составляла ~ 100 кА. На изображении видна хорошо развившаяся перетяжка. Наиболее сильно фарадеевский эффект проявляется в области выброса плазмы, однако мы рассмотрим результаты восстановления магнитного поля и электронной плотности в сечениях А (на расстоянии 100 мкм от перетяжки вдоль оси пинча) и В (в области перетяжки).

На рис.2а представлены результаты восстановления индукции магнитного поля и электронной плотности в сечении А. Магнитное поле достигает

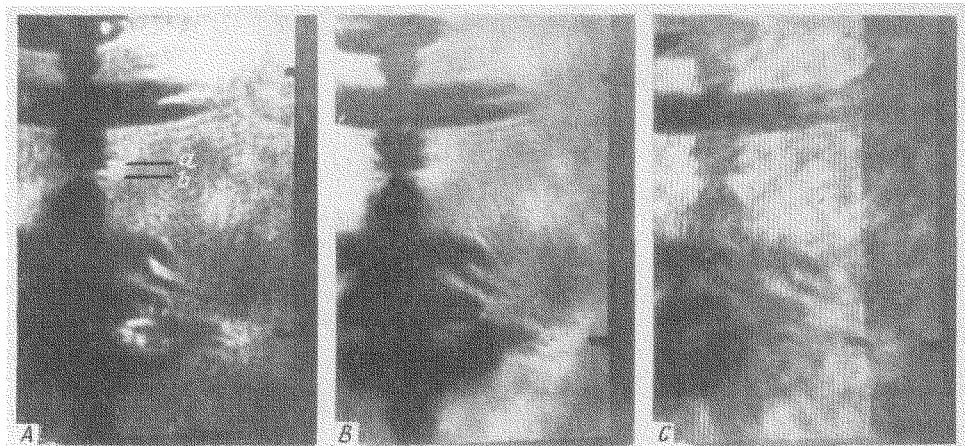


Рис.1 Фарадеевское (А), теневое (В) и интерференционное (С) изображения плазмы взрывающейся 25 мкм Al-проволочки в момент протекания по ней тока 100 кА и за 13 нс до начала рентгеновского излучения

величины 460 кГс на расстоянии 400 мкм от оси пинча. Максимум электронной плотности достигает величины $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ на расстоянии 270 мкм от оси пинча. Эти результаты показывают, что максимальный ток в сечении А ограничен диаметром 800 мкм и составляет 90 кА, что хорошо согласуется с результатами электротехнических измерений. На рис.2b и рис.2c представлены результаты восстановления в сечении В интерференционного набега фазы (b) и угла поворота плоскости поляризации (c). Распределение угла поворота носит чисто шумовой характер с амплитудой шумов $\alpha = \pm 0,05^\circ$, при этом интерференционный набег фазы носит сигнальный характер с максимальной величиной $\delta \sim 0,3$ линии на расстоянии ~ 50 мкм (что соответствует средней электронной плотности $\sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Это позволяет получить верхнюю оценку средней величины магнитного поля [4]:

$$B = 0,56 \cdot \alpha / \delta \sim 90 \text{ кГс},$$

где α – в градусах, δ – в линиях. Соответственно сила тока не превышает 2 кА, то есть менее 2% от общего тока.

Для уверенного восстановления столь малых величин интерференционного набега фазы была создана специальная методика. В основе этой методики лежит дифференциальный принцип обработки с использованием априорной информации о начальном положении невозмущенных интерференционных линий. Непосредственно перед рабочим выстрелом установки производился прострел зондирующим лазером интерференционного канала трехканального поляроинтерферометра. Сформированная таким образом невозмущенная интерферограмма сохранялась в памяти компьютера. После рабочего выстрела координаты максимума и минимума вдоль выбранного сечения интерферограммы Z-пинча сравнивались с соответствующими координатами в комплементарном сечении невозмущенной интерферограммы, что и позволяло получить точность восстановления набега фазы на уровне $\sim 0,03$ линии. Координатная привязка двух интерферограмм производилась при помощи визуализирующей диафраг-

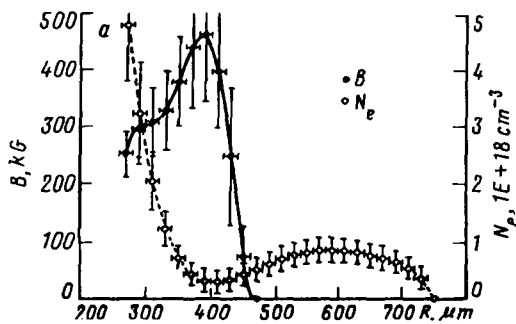


Рис.2 Распределение магнитного поля и электронной плотности (а) в сечении А, а также интерференционного набега фазы (b) и угла поворота плоскости поляризации с в сечении В

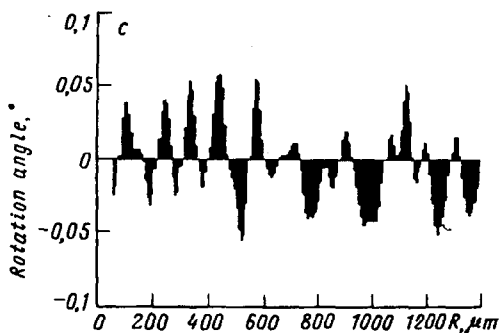
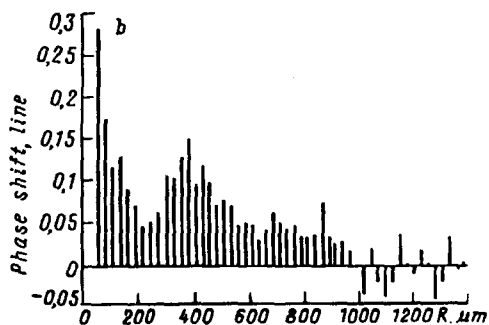


Рис.2

мы. Данная методика позволила избежать ошибок, связанных с неидеальностью оптических элементов диагностического комплекса.

На рис.3 представлены двумерное распределение интерференционного набега фазы (а), восстановленное в результате обработки большого количества радиальных сечений на интерферограмме с шагом вдоль оси в 25 мкм, и соответствующий ему фрагмент теневого изображения (b) области перетяжки. На фазовом изображении видно возникновение радиального плазменного выброса, направленного от центра пинча к его периферии. Этим плазменным выбросом, по-видимому, можно объяснить переключение тока на низкоплотную периферийную плазму.

В эксперименте наблюдалось удивительное явление - магнитное поле вблизи перетяжки практически равно нулю, соответствующая доля тока не превышает ~ 2%. Это находится в полном противоречии с известным стандартным сценарием [6-9], согласно которому плазма вытекает из перетяжки вследствие повышенного магнитного давления, а магнитное поле увеличено из-за сжатия плазмы с вмороженным магнитным полем.

Следует, однако, отметить, что стандартный сценарий был разработан для плазмы, описываемой одножидкостной МГД, в которой главный механизм эволюции магнитного поля - конвекция движением плазмы, которое в этом приближении неотлично от движения ионов. Однако применимость МГД ограничена большими линейными плотностями электронов [9], $N_e > M_e c^2 / Ze^2$. Для дейтерия это соответствует $N_e > 10^{17} \text{ см}^{-1}$, для двукратно ионизованного алюминия $N_e > 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-1}$. В современных быстрых пинчах, стартующих с малого радиуса, это условие нередко нарушено, даже если полагать, что вся

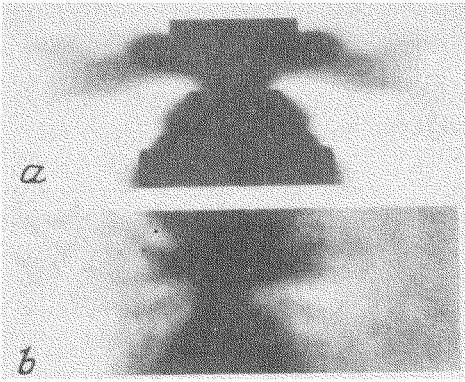


Рис.3 Двумерное распределение интерференционного набега фазы в области перетяжки (а) и соответствующий ему фрагмент теневого изображения (б), демонстрирующее наличие радиального выброса плазмы на периферии пинча

проволочка испарилась. Интерференционные измерения электронной плотности в перетяжке взрывающейся проволочки [10] показывают, что в условиях наших экспериментов линейная плотность была порядка $N_e = 10^{15} \text{ см}^{-1}$, то есть далеко за пределами одножидкостной МГД, но как раз в пределах применимости электронной МГД ($m_e c^2 / e^2 < N_e < M_i c^2 / Z e^2$), в которой токовая скорость превышает альфвеновскую и главным механизмом эволюции магнитного поля становится конвекция магнитного поля током электронов [9]. Этот важнейший механизм был впервые рассмотрен для плазмы полупроводников [11, 12]. Для качественного объяснения наших экспериментов достаточно вспомнить, что в первом приближении электронной МГД ток протекает вдоль линий $n_e r^2 = \text{const}$ [13]. Из этого выражения следует, что ток и магнитное поле выносятся конвекцией из областей с малой линейной плотностью (перетяжка) в противоречие со стандартной одножидкостной картиной и в согласии с нашими экспериментами (рис.3). Ранее этот механизм привлекался для объяснения стабилизации области перетяжки пинчей с большим начальным линейным числом [9], которая действительно нередко происходит при понижении линейной плотности до порога применимости МГД, но предсказания наблюдаемой картины не было, хотя формулы, из которых непосредственно следует эффект потери тока, были написаны.

Возникает естественный вопрос: если ток из перетяжки пропал, то какой механизм вытолкнул оттуда плазму? Частичный ответ на этот вопрос был дан в теории плазменных размыкателей [13, 14] на основе электронного МГД сопротивления:

$$R[\text{Ом}] = 15u/c,$$

где $u = I / (\pi r^2 n_e e)$ – средняя токовая скорость в см/с, I – сила тока в А, r – радиус перетяжки в см, e – заряд электрона в Кл. Из этой формулы следует, что при понижении линейной концентрации плазмы $\pi r^2 n_e$, электронное МГД сопротивление быстро растет и происходит тепловой взрыв. В условиях наших экспериментов этот процесс завершается практически полной потерей тока из перетяжки.

Таким образом, приведенные результаты измерения структуры магнитного поля в области перетяжки Z-пинча, образованного при взрыве 25 мкм Al-проволочки, радикально меняют картину образования перетяжки. Каче-

ственные черты явления находятся в согласии с электронной магнитной гидродинамикой.

Авторы выражают благодарность В.В.Янькову за полезные обсуждения результатов экспериментов и ценные замечания, сделанные им в ходе подготовки работы к публикации.

Выполненная работа была в основном поддержана контрактом ЕС #SC1* - СТ91-0728, контрактом ЕТСА/СЕГ #420/115/01 и контрактом DRET #92/134, а также частично грантом ISF MM1000 и грантом RFFI 94-02-03864-а.

-
1. S.Czekaj, A.Kasperczuk, R.Miklaszewski et al., *Plasma Phys. and Control. Fusion* **31** (4), 587 (1989).
 2. В.А.Веретенников, А.Е.Гурей, С.Н.Полухин и др., *Физика плазмы* **16**, 818 (1990).
 3. А.В.Браницкий, В.Д.Вихарев, А.Г.Касимов и др., *Физика плазмы* **18**, 1131 (1992).
 4. Т.Писарчик, А.А.Рупасов, Г.С.Саркисов, А.С.Шиканов, *Препринт 135*, М.: ФИАН, (1989); (*J. Sov. Laser Res.* **11**, 1 (1990)).
 5. G.S.Sarkisov, B.Etlicher, C.Rouille, and S.Attelan, *Preprint LPMI 2986*, Ecole Polytechnique, (1994).
 6. A.C.Kolb, *Rev. Mod. Phys.* **32**, 74 (1960).
 7. В.Ф.Дьяченко, В.С.Имшенник, *Вопросы теории плазмы*, под ред. М.А.Леонтовича, вып.8, М.: Атомиздат, (1974), с.164.
 8. В.В.Вихрев, С.И.Брагинский, *Вопросы теории плазмы*, под ред. М.А.Леонтовича, вып.10, М.: Атомиздат, (1980), с.251.
 9. В.В.Яньков, *Физика плазмы* **17**, 521 (1991).
 10. G.S.Sarkisov, B.Etlicher, C.Rouille, and S.Attelan, *Preprint LPMI 2987*, Ecole Polytechnique (1994).
 11. А.И.Морозов, А.П.Шубин, *ЖЭТФ* **46**, 710 (1964).
 12. В.И.Брызгалов, А.И.Морозов, *ЖЭТФ* **49**, 1789 (1965).
 13. К.В.Чукбар, В.В.Яньков, *ЖТФ* **58**, 2130 (1988).
 14. П.В.Сасоров, *Письма в ЖЭТФ* **56**, 614 (1992).