

УДК 004.9

О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СПОНТАННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ТУРБУЛЕНТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ.

Лебо И.Г., д.ф.-м.н., профессор, E-mail: lebo@mirea.ru

МГТУ МИРЭА,

Лебо А.И., соискатель, E-mail: lebo_a_i@email.ru

ИнтерЭВМ и ЦИТИС,

Москва, Россия

Аннотация. Предложены и обсуждаются новые подходы к проблеме наблюдения спонтанных магнитных полей в высокотемпературной турбулентной плазме, образованной при взаимодействии мощного лазерного импульса с мало плотной структурированной средой.

Ключевые слова: турбулентная лазерная плазма, наблюдение спонтанных магнитных полей, диагностический пучок релятивистских электронов

ON THE POSSIBILITY OF DYAGNOSTICS OF SPONTANEOUS MAGNETIC FIELD IN TURBULENT LASER PLASMA.

Lebo I.G., D. of Science, the professor, E-mail: lebo@mirea.ru

MSTU MIREA,

Lebo A.I., E-mail: lebo_a_i@email.ru,

ICIE,

Moscow, Russia

Annotation. The new approaches to problem of spontaneous magnetic field observation in high temperature turbulent plasma have proposed and discussed. The plasma has produced powerful laser pulse, which interacted with low density porous matter.

Key words: turbulent laser plasma, spontaneous magnetic field observation, relativistic electron beam for diagnostics of the plasma

1. ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях по физике высокотемпературной лазерной плазмы значительный интерес уделяется изучению механизмов поглощения и распространения энергии в мало плотных пористых средах под воздействием мощных лазерных импульсов (смотри, например [1-3]).

В [4] для интерпретации результатов натуральных экспериментов, выполненных на установке PALS [5] в Физическом институте Чешской академии наук была предложена физико-математическая модель турбулентной плазмы, образованной при воздействии мощных лазерных импульсов на трехмерно-структурированную мало плотную среду (со средней плотностью порядка 3-18 мг/см³). Эта модель получила дальнейшее развитие в работах [6, 7]. В основу этой модели были положены две гипотезы: 1) при тепловом взрыве

и соударении стенок пор формируется турбулентная плазма с типичным размером вихрей порядка масштаба пор; 2) эти вихри существуют достаточно длительное время (t_2), значительно превосходящее время формирования плазмы ($t_2 \gg t_1 \approx d/V_S$ здесь d – размер поры, V_S – скорость звука в плазме) и по порядку величины сравнимое с длительностью лазерного импульса ($t_2 \sim \tau$).

Несколько позже к подобному выводу пришел другой автор, занимающейся теорией распространения импульса энергии в пористой среде. В обзоре [8] отмечается, что процесс гомогенизации среды проходит в две стадии: на первой стадии происходит формирование плазмы и затекание пор, (на временах порядка и менее $t_1 \sim 0,1$ нс); и существует «вторая стадия, которая является более медленным процессом, и приводит к полной однородности за счет механизма вязкости». В обзоре не приводится физико-математическая модель, которая позволила бы описать поведение плазмы на этой стадии.

По аналогии с моделью турбулентности Беленького-Фрадкина [9] мы предложили изменить коэффициенты переноса энергии в такой плазме, где наряду с обычной длиной электрон-ионных соударений (l_{ei}) важную роль будет играть масштаб турбулентной пульсации ($l_p \sim d$) в том случае, когда он становится меньше, чем l_{ei} (в горячей плазме).

Предложенная авторами модель легла в основу программы «Atlant_C_turb», которая позволила провести численное моделирование натуральных экспериментов, и получить количественное согласие по скорости распространения гидро-тепловой волны, а также объяснить характер свечения в рентгеновском диапазоне (при наблюдении сбоку) и в оптическом диапазоне на тыльной стороне мишени.

Известно, что в проводящей турбулентной среде генерируются спонтанные магнитные поля [10]. В горячей лазерной плазме (с температурой порядка 1 кэВ) эти поля могут достигать значений ~ 10 МГ. Следуя оценке из [6] получим

$$B \leq \frac{c}{e} \frac{\nabla T}{l_p} \frac{L}{u} \sim 10 \text{ МГс}$$

Здесь c – скорость света, e – заряд электрона, ∇T – типичный градиент температуры в плазме, l_p – масштаб турбулентной пульсации, u – скорость потока высокотемпературной плазмы, L – ее типичный размер. Из численных расчетов, моделирующих облучение пористых мишеней, можно получить следующие оценки $\nabla T \approx 1.6 \cdot 10^7$ эрг/см, $d \approx 1$ мкм, $u \approx 300$ км/с, $L \approx 100$ мкм.

Сформированные вихри и поля эволюционируют вместе с плазмой.

Наблюдение сверхсильных магнитных полей в лабораторных условиях представляет самостоятельный интерес. Замагниченность лазерной плазмы может привести к изменению

процессов переноса энергии электронами и α -частицами в сжатых термоядерных мишенях [11].

Особенностью генерации этих полей является тот факт, что в общем случае они формируются в сильно неоднородной турбулентной плазме и ориентированы в произвольном направлении. Причем, поскольку пространственный масштаб пор ≤ 1 мкм, то и соответствующие «витки» токов и полей будут иметь такой же масштаб. Поэтому усредненный по пространству, занятому плазмой, магнитный момент будет равен нулю. Возникает ситуация схожая с распределением магнитных моментов доменов в ферромагнетике. В этой ситуации наблюдение полей в плазме с помощью традиционного оптического метода, основанного на эффекте Фарадея, представляется крайне затруднительным.

Целью настоящей статьи является сформулировать два подхода, которые позволили бы наблюдать поля в турбулентной плазме.

2. О ВОЗМОЖНОСТИ СФОРМИРОВАТЬ РЕГУЛЯРО НАПРАВЛЕННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ.

В [12] представлены результаты экспериментов по воздействию внешнего магнитного поля на лазерную плазму, выполненные на установке OMEGA (США). Начальное магнитное поле, порядка 10 Тл (или 0.1 МГц) создавалось за счет пропуска мощного импульса тока через виток. Внутри витка помещалась сферическая оболочечная лазерная мишень, которая облучалась со всех сторон лазерными пучками. В процессе сжатия лазерной мишени поля, вмороженные в плазму, достигали величины порядка 1000 Тл [12]! Заметим, что такие эксперименты можно провести лишь при наличии мощной многоканальной лазерной установки.

Рассмотрим следующую задачу. Лазерная мишень помещена в магнитное поле, которое образуется с помощью устройства, показанного на рис.1а. Мишень представляет из себя пористую среду со средней плотностью несколько мг/см³ и толщиной порядка 1 мм, помещенную на полимерную (или металлическую) подложку. Она облучается одним мощным лазерным импульсом с интенсивностью $\sim 10^{14}$ - 10^{15} Вт/см² и длиной волны 0.35-1 мкм..

На масштабах времени существования лазерной плазмы ~ 1 нс магнитное поле, созданное таким витком, можно считать постоянным и направленным строго вдоль оси OZ (смотри рис.1а). Элементарные токи и поля в турбулентной лазерной плазме от пористой мишени и ориентированы в произвольных направлениях и вне плазмы, поле отсутствует (рис.1б). Под действием внешнего поля магнитные моменты будут преимущественно ориентироваться вдоль силовых линий этого поля. При этом, вне плазмы поле будет

убывать $\sim r^{-3}$. Таким образом, если на размере $L \sim 100$ мкм масштаб поля $B_0 \sim 1000$ Тл, то на расстоянии 1 мм, $B \sim 1-10$ Тл, то есть сравнимы по величине с внешним полем. В принципе, с помощью диагностического зонда можно наблюдать изменение магнитного поля в несколько раз за счет эффекта такого «плазменного ферромагнетизма» (рис. 1с). (Заметим, что впервые магнитные поля вблизи лазерной искры наблюдались именно с помощью такого зонда [13, 14]).

Следует провести три серии экспериментов: 1) измерение с помощью зонда магнитных полей в вакууме, сформированных внешним витком, 2) измерение магнитных полей в окрестности турбулентной плазмы, образованной под воздействием мощного лазера на пористую мишень в отсутствие внешнего поля, 3) измерение поля в окрестности плазмы при наличии внешнего поля.

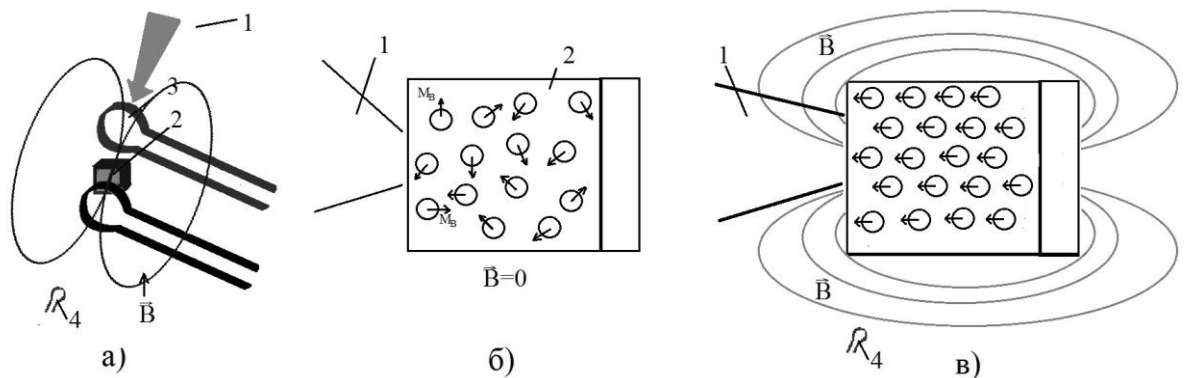


Рис. 1. Схема устройства для создания внешнего магнитного поля в окрестности лазерной мишени (а)
 пористая мишень на подложке и распределение магнитных моментов в турбулентной лазерной плазме (b)
 переориентация магнитных моментов в турбулентной плазме под воздействием внешнего магнитного поля (с).
 1 – лазерный луч, 2 – мишень 3- витки, создающие внешнее поле, 4 – диагностический зонд, В – силовые линии магнитного поля, создаваемого витком.

Сравнивая результаты трех типов измерений, можно будет сделать вывод о наличии в турбулентной плазме сильных магнитных полей.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПУЧКА.

В [15-17] обсуждалась возможность наблюдения спонтанных магнитных полей (СМП) с помощью диагностического пучка электронов. В отличие от рассмотренного выше подхода в этом случае уже возможно наблюдать поля внутри плазмы. По сравнению с традиционными оптическими методами, основанными на эффекте Фарадея вращения

плоскости поляризации зондирующего лазерного луча, распространяющегося вдоль силовой линии [18-20], метод, основанный на рассеянии электронного зондирующего пучка, имеет ряд преимуществ.

Ниже обсуждается возможность создания такого диагностического пучка на основе лазер-плазменного диода [22, 23]¹.

Формирующий плазму лазерный пучок должен иметь интенсивность 10^{14} - 10^{15} Вт/см² и длительность порядка 1 нс с энергией, достаточной для создания фокального пятна с диаметром 200-500 мкм. Второй лазерный импульс, предназначенный для формирования диагностического пучка электронов, должен иметь длительность порядка 10-100 пс, интенсивность 10^{16} - 10^{17} Вт/см² и диаметр фокального пятна 10-50 мкм. Диагностический пучок электронов создается в специальном устройстве, состоящем из катода и двух анодов. Напряжение между катодом и первым анодом должно быть порядка 10 кВ. В промежутке L1 формируется пучок электронов. Далее необходимо существенно увеличить энергию электронов на промежутке L2. Разность потенциалов между первым и вторым анодами должна превосходить 200 кВ, чтобы ускорить эти электроны до соответствующей энергии 100-200 кэВ.

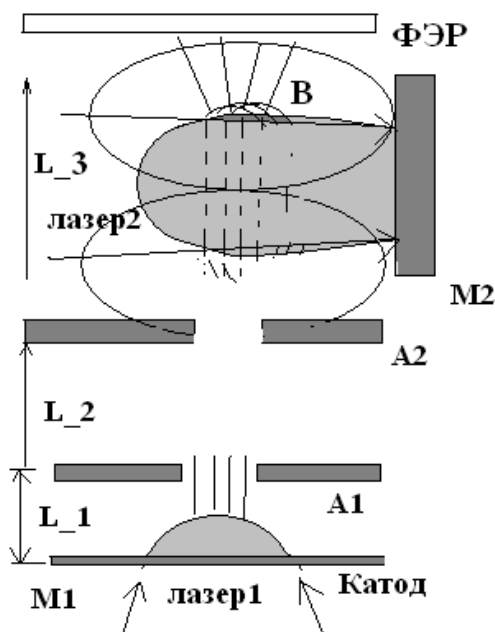


Рис. 2. Схема конструкции устройства для формирования диагностического пучка электронов. Лазер 1 - лазерный пучок, формирующий плазму для создания свободных электронов, лазер 2 – пучок, для формирования турбулентной плазмы, М2 – мишень для создания плазмы, М1 – мишень для формирования диагностического пучка электронов, А1 – первый анод, А2 – второй анод, ФЭР – фото-электронный регистратор.

¹ В [12] по рассеянию пучка 14 МэВ-ных протонов измерялась величины магнитного поля в сжатой сферической термоядерной мишени. Такой пучок был создан при облучении дополнительной диагностической оболочечной мишени, облученной 20 пучками на установке OMEGA. К сожалению, в настоящее время в России нет подобной установки, поэтому, на наш взгляд, технически проще создать электронный диагностический пучок.

Такие электроны смогут проходить почти без рассеяния за счет столкновений через лазерную плазму, но будут отклоняться в сильном магнитном поле [17]. Действительно, средне-квадратичный угол рассеяния электронов за счет «кулоновских столкновений» в магнитном поле равен

$$\langle \phi \rangle = 0.55 \cdot \sqrt{\frac{Z \langle \rho L \rangle \cdot \Lambda_Q}{A E_e^2 [\text{МэВ}]}} \approx 0.005 [\text{рад}].$$

Здесь Z , A – усредненный заряд и атомная масса

ионов плазмы, $\langle \rho L \rangle = \int_0^L \rho dx$ – интегральная плотность плазмы вдоль направления пучка электронов (взятая в единицах СГСЭ), Λ_Q – Кулоновский логарифм, E_e – энергия электрона в пучке в МэВ. Для магнитных полей порядка 1000 Тл ларморовский радиус ~ 1 мкм, то есть отклонение в магнитном поле существенно больше, чем из-за рассеяния. В случае произвольно направленных магнитных полей в вихрях эффект влияния поля приведет к существенному увеличению эффективного диаметра диагностического пучка, а при наложении внешнего магнитного поля и упорядочивания магнитных моментов, наряду с увеличением изображения, возникнет существенная анизотропия изображения.

Отклонение диагностических электронов можно будет зарегистрировать с помощью ФЭР. Облучение плазмы под разными углами позволит создать объемную картину распределения полей в плазме [24].

На рис.3А показана схема эксперимента. На рис.3В прогнозируемое изображение в приемном устройстве в отсутствие внешнего магнитного поля. На рис. 3С показано прогнозируемое изображение при наличии такого поля.

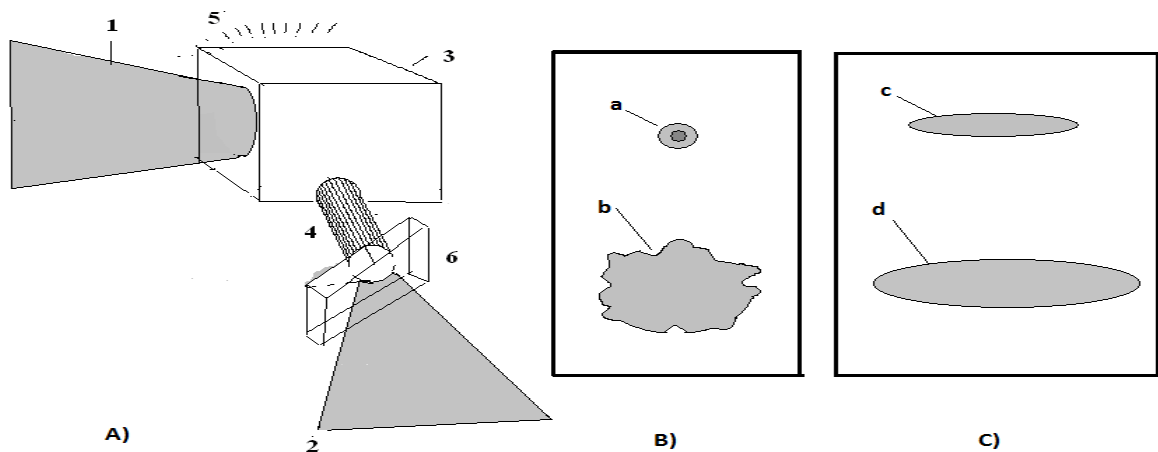


Рис.3. Схема эксперимента по наблюдению СМП в плазме с помощью пучка электронов (А). 1- Основной формирующий плазму пучок наносекундной длительности, 2 – формирующий пучок электронов лазерный луч пикосекундной длительности, 3 – пористая мишень, 4 – диагностический пучок электронов, 5 – рассеянный пучок электронов, 6 – устройство для формирования диагностического

пучка. В). Изображение диагностического пучка в приемном устройстве в отсутствие пористой среды (верхний рисунок а) и при наличии пористой среды (нижний рисунок - б). С). Изображение пучка при наличии внешнего магнитного поля (в отсутствие пористой мишени- с, и при ее наличии - d)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

- Обсуждается возможность воздействия внешнего магнитного поля на магнитные моменты, возникающие в турбулентной лазерной плазме.
- При наложении сильного внешнего поля возможно упорядочивание магнитных моментов в турбулентной плазме. Это позволит наблюдать спонтанные магнитные поля с помощью диагностического зонда, помещенного вблизи плазменного факела.
- Рассмотрена схема создания диагностического пучка электронов и наблюдения спонтанных магнитных полей по их рассеиванию.

Список литературы

1. Розанов В.Б. // Успехи физических наук, т.174, 371-382, (2005)
2. Borisenko N.G., Akunets A.A., Khalenkov A.M. et al. // Journal of Russian Laser Research, 28, N6, 548-566, (2007)
3. Borisenko N.G., Merkuliev Yu.A. // Journal of Russian Laser Research, 31, N3, 256-269, (2010)
4. Лебо А.И., Лебо И.Г. // Математическое моделирование (2009), т.21, №1, 75-91
5. Jungwirht K., Cenjarova A., Juha L., et al. // Phys. Plasmas, v.8, 2495-3006, (2006)
6. Лебо А.И., Лебо И.Г. // Математическое моделирование, (2009), т.21, №11, 16-18
7. Lebo A.I., Lebo I.G. // IOP Science, Physica Scripta 2010, T142, 014024
8. Gus'kov S.Yu. // Journal of Russian Laser Research, v.31, N6, 2010, p.576-578
9. Беленький С.З., Фрадкин Е.С. // Труды ФИАН, т.209, 207, (1965)
10. *Batchelor G.* // Proceedings of the Royal Society of London, Ser. Math. And Phys. Sciences, v.21, London, Cambridge Univ., 23 May, 1950
11. *Конаш П.В., Лебо А. И., Лебо И.Г.* // Математическое моделирование, (2013), т.25, №6, 3-14
12. *Gotchev O.V. et al.* // Physical Review Letters, 2009, 103, 215004
13. *Коробкин В.В., Серов Р.В.* Письма в ЖЭТФ, 1966, т.4, с.103-106
14. *Stamper J. A. et al.* // Phys. Fluids, (1971), v.26, 1012-1019
15. *Лебо И.Г.* Спонтанные магнитные поля в сферических лазерных мишенях. Препринт ФИАН, Москва, № , 1980

16. *Котельников С.С., Лебо И.Г., Розанов В.Б.* // Краткие сообщения по физике ФИАН, М.-1986, №12, 58-61
17. *Конаш П.В., Лебо И.Г.* // Квантовая электроника, (2006), т.36, №8, 767-782
18. *Stamper J.A., McLean E.A., Ripin V.H.* // Phys. Rev. Letters, 40,1177, (1978)
19. *Raven A., Willi O., Rumsby P.T.* // Phys. Rev. Letters, 41, 554, (1978)
20. *Бункин Ф.В., Касьянов Ю.С., Коробкин В.В., Мотылев С.Л.* // Квантовая электроника, 1983, 10, 2149
21. *Басов Н.Г. и др.* // Письма в ЖЭТФ, 45, 173, (1987)
22. *Коробкин Ю.В., Лебо А.И., Лебо И.Г.* // Квантовая электроника, 2010, т.40, №10, 811-816
23. *Коробкин Ю.В., Лебо А.И., Лебо И.Г., Романов И.В.* // Научный вестник МИРЭА, М., 2013, №1(13), 66-79
24. *Lebo I.* On the approach to the experimental study of hydrodynamic instability development in compressed laser targets. IFSA-2007, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 112 (2008) 022018