

СТРУКТУРА СПОНТАННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

В.В.Коробкин, С.Л.Мотылев, Р.В.Серов,

Давид Ф.Эдвардс¹⁾

Проведено экспериментальное исследование спонтанных магнитных полей, возникающих при взаимодействии мощного лазерного излучения с металлической мишенью. Обнаружено, что сигнал состоит из двух компонент: быстрой — \dot{B}_1 и медленной — \dot{B}_2 . Установлено, что за происхождение \dot{B}_1 ответственна электронная эмиссия. Механизм генерации \dot{B}_2 обусловлен взаимодействием разлетающейся плазмы с остаточным газом.

В последнее время является общепризнанной важная роль, которую спонтанные магнитные поля играют в лазерной плазме. Однако, хотя после первого сообщения о регистрации спонтанных магнитных полей [1] было опубликовано уже достаточно много работ (см., например, [2–6]), окончательный вывод о механизмах этого явления сделать еще нельзя. Сейчас можно предложить, как минимум, четыре возможных механизма генерации спонтанных магнитных полей: 1) поток заряженных частиц, вылетающих из плазмы; 2) разделение зарядов, возникающее при взаимодействии плазмы с остаточным газом; 3) термоэлектродвижущая сила, возникающая при непараллельности ∇T и ∇n в плазме; 4) световое давление.

Целью настоящей работы было выяснение механизмов генерации спонтанных магнитных полей при плотностях лазерного излучения 5×10^{11} вт/см². В эксперименте использовался лазер на неодимовом стекле, работавший в режиме одной аксиальной и одной угловой моды ТЕМ₀₀. Выходная энергия достигала 2 дж при длительности импульса 30 нсек. Излучение фокусировалось в вакуумную камеру линзой с $f = 24$ см. Использовались металлические мишени (железо, медь и алюминий), электрически соединенные с вакуумной камерой. Производная магнитного поля \dot{B} измерялась датчиком, представляющим собой катушку диаметром 2,5 мм. Сигнал с датчика подавался на осциллограф типа С1-11. Постоянная времени всей системы регистрации составляла 3,5 нсек. Конструкция вакуумной камеры была такова, что датчик мог перемещаться относительно плазмы по r и z (см. рис. 1, а) и поворачиваться на любой угол относительно проходящей через его диаметр оси. Критерием того, что сигнал имеет магнитную природу, являлось изменение его полярности при повороте датчика на 180°, а также ра-

¹⁾ Научный сотрудник Лос-Аламосской научной лаборатории калифорнийского университета США, работавший в ФИАН'е по программе обмена между АН СССР и НАН США.

венство нулю полного интеграла от сигнала. При давлении остаточного газа P , лежащем в диапазоне $10^{-1} - 10^{-4}$ тор и расстоянии между центром датчика и фокальным пятном $R \geq 0,5$ см отчетливо наблюдались две компоненты сигнала \dot{B} . Типичные осциллограммы для различных положений датчика приведены на рис. 1, б. Составляющие сигнала \dot{B}_1

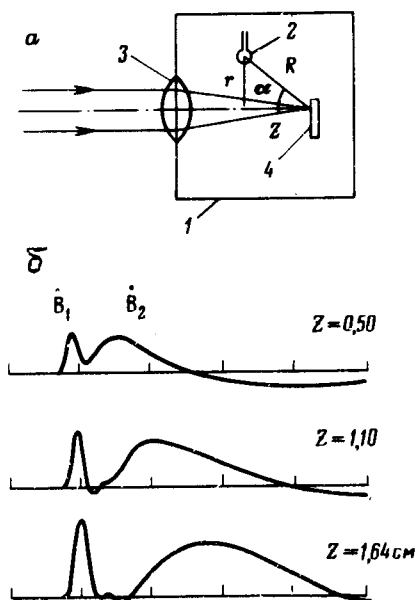


Рис. 1. (а) схема эксперимента: 1— вакуумная камера, 2 — магнитный датчик, 3 — фокусирующая линза, 4 — мишень. (б) Осциллограммы сигнала с датчика для трех различных положений по оси z , при фиксированном давлении остаточного газа равном $0,1$ тор. Масштаб по оси времени 1 деление — 100 нсек

и \dot{B}_2 имеют различную природу. Прежде всего, отметим, что они различным образом зависят от давления остаточного газа в камере (см. рис. 2). Так, при изменении давления от 10^{-4} до 10^{-2} тор \dot{B}_1 увеличивается в три раза, в то время как \dot{B}_2 увеличивается более чем на два порядка. При дальнейшем увеличении давления \dot{B}_1 медленно спадает (в три раза при 1 тор), в то время как \dot{B}_2 обращается в нуль при $0,3$ тор. При давлении менее 10^{-4} тор существует только \dot{B}_1 . Отсюда следует вывод, что главным механизмом, ответственным за появление \dot{B}_2 является взаимодействие разлетающейся плазмы с остаточным газом. Наиболее вероятным представляется возникновение диполя вследствие разделения зарядов на фронте расширяющейся плазмы. Наблюдаемая полярность сигнала показывает, что впереди идут электроны, как это и должно быть в случае

амбиполярной диффузии. Составляющая \dot{B}_2 задержана относительно \dot{B}_1 на время t , зависящее от положения датчика (см. рис. 1, б). Величина z/t , равная $1,2 \cdot 10^7$ см/сек, удовлетворительно совпадает со средней скоростью расширения лазерной плазмы, см., например, в работе [7]. Следует отметить, что зависимость от давления измерялась при неизменном положении датчика $r = 1,0$ см; $z = 1,5$ см.

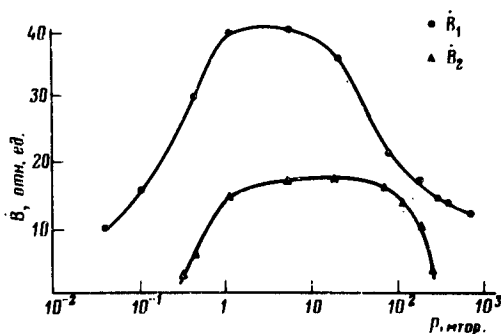


Рис. 2. Зависимости сигналов \dot{B}_1 , \dot{B}_2 от давления остаточного газа

Что касается составляющей \dot{B}_1 , то основным механизмом, ответственным за ее появление, является эмиссия электронов из лазерной плазмы. Прежде всего, отметим, что длительность импульса \dot{B}_1 , равная 30 нсек по полувысоте, удовлетворительно совпадает с длительностью лазерного импульса и не зависит от положения датчика; амплитуда \dot{B}_1 , как это и должно быть в случае элемента тока достаточно удовлетворительно описывается законом Био и Савара. Измеренная зависимость имеет вид $\dot{B}_1 \sim \sin \alpha / R^{2,2}$ (см. рис. 3). Кроме того, эксперименты показали, что в случае мишени из диэлектрика или изолированной от стенок вакуумной камеры достаточно маленькой металлической мишени первая составляющая уменьшается минимум в 100 раз. Объяснение этого факта — возникновение сильного пространственного заряда, удерживающего электроны вблизи фокальной области. Полярность сигнала \dot{B}_1 подтверждает факт эмиссии именно электронов. (Составляющая \dot{B}_2 для диэлектрических или малых металлических мишеней подробно не исследовалась).

Магнитное поле как B_1 , так и B_2 имеет цилиндрическую симметрию относительно оси лазерного луча. При этом вектор магнитного поля лежит в плоскости, перпендикулярной к этой оси. В наших экспериментах не было зарегистрировано компонент магнитного поля, параллельных оси луча. Максимальное значение напряженности поля, зарегистрированное в наших экспериментах, составляет 100 э на расстоянии 5 мм от фокальной области.

Отметим, что прямая экстраполяции результатов к размерам фокального пятна могла бы дать поля порядка 10^6 э. Однако такую экстраполяцию, на наш взгляд, можно проводить только до границ области, занятой плазмой для B_2 и до границ электронного облака для B_1 , которые в наших условиях много больше размеров фокального пятна. По-видимому, максимальные магнитные поля в наших экспериментах составляли несколько килоэрстед.

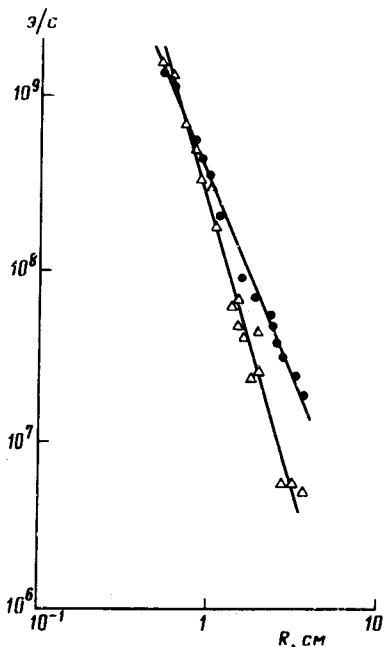


Рис. 3. Пространственные зависимости сигналов. Экспериментальные точки: $\Delta - \dot{B}_2$; $\circ - \dot{B}_1/\sin \alpha$. Экстраполяция: $\dot{B}_2 \sim R^{-3,2 \pm 0,15}$; $\dot{B}_1/\sin \alpha \sim R^{-2,2 \pm 0,1}$

Таким образом, можно утверждать, что при плотностях потока 5×10^{11} $вт/см^2$ основными механизмами генерации спонтанных магнитных полей в лазерной плазме являются эмиссия электронов и разделение зарядов на границе расширяющейся плазмы.

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

Поступила в редакцию
26 апреля 1977 г.

Литература

[1] В.В.Коробкин, Р.В.Серов. Письма в ЖЭТФ, 4, 70, 1966.

- [2] Г.А.Аскарьян, М.С.Рабинович, А.Д.Смирнова, В.Д.Студенов. Письма в ЖЭТФ, 5, 93, 1967.
- [3] J.A.Stamper, K.Papadopoulos, R.N.Sudan, S.O.Dean, E.A.McLean, J.M.Dawson. Phys. Rev. Lett., 26, 1912, 1971.
- [4] R.S.Bird, L.L.McKee, F.Schwirzke, A.W.Cooper. Phys. Rev., A7, 1328, 1973.
- [5] R.V.Serov, M.C.Richardson. Appl. Phys. Lett., 28, No 3, 1976.
- [6] J.A.Stamper, B.H.Ripin. Phys. Rev. Lett., 34, 135, 1975.
- [7] В.В.Коробкин, С.Л.Мандельштам, П.П.Пашинин, А.В.Прохиндеев, А.М.Прохоров, Н.К.Суходрев, М.Я.Щелев. ЖЭТФ, 53, 116, 1967.
-