

激光等离子体冕区自生磁场的实验研究

章辉煌 林尊琪 王笑琴 施阿英

(中国科学院上海光机所)

提要: 采用 630.3 nm 光探针的 Faraday 施转法测量了激光等离子体冕区的自生磁场。实验结果证实了 Colombant 从理论上提出的“热力源”是产生自生磁场的重要源项之一。

Experimental study of self-generated magnetic field in corona area of laser plasmas

Zhang Huihuang, Lin Zunqi, Wang Xiaojin, Shi Aying

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: Self-generated magnetic field in the corona area of laser plasmas has been measured using Faraday-rotation method of 630.3 nm probe beam. Experimental results prove that “thermal force source” which Colombant has suggested theoretically is one of the important sources which produce self-generated magnetic field.

一、引言

在激光等离子体冕区,人们早已发现存在着兆高斯量级自生磁场^[1, 2]。这种高强的环形磁场可引起热电子传输受阻^[3, 4]以及影响冕区电子密度轮廓分布^[5]。产生自生磁场的机制十分复杂、繁多,其中最主要的是 $\nabla n_e \times \nabla T_e$ 热致磁场机制^[6],它已在实验上充分地得到证实^[7]。但尚有不少机制仅停留在理论预言上,未在实验上予以证实。1977年 Colombant^[8]提出关于“热力源”影响自生磁场结构的理论预言。他认为仅仅考虑 $\nabla n_e \times \nabla T_e$ 机制是不全面的,它作为产生自生磁场

的“基本源”,只能粗略地反映自生磁场的主要轮廓,不能反映自生磁场的精细结构。与此相反,“热力源”虽不是产生自生磁场真正的源项,但它可影响自生磁场的结构分布,如导致自生磁场最大值下降、扩大自生磁场空间范围等。这一理论预言至今尚未得到证实。

本文采用 630.3 nm 光探针的 Faraday 偏振旋转法,测量铜丝靶($\phi 1\text{mm}$)上自生磁场时间和空间分布;并将实验结果与 Colombant 的理论模拟结果进行比较,证实了他提出的关于“热力源”的理论预言。

收稿日期:1986年11月25日。

二、实验装置

实验用六路高功率 Nd 玻璃激光装置上的两路激光, 一路为主激光, 其脉宽 250 ps, 焦斑功率密度 $3 \sim 4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$; 另一路进入 KDP 晶体倍频, 再经乙醇的喇曼频移, 产生出 630.3 nm 的红光, 作为光探针, 其脉宽 100 ps, 能量 $500 \mu\text{J} \sim 1 \text{ mJ}$ 。两路激光的等光程测量由可见光条纹相机完成, 同步精度达 $15 \sim 20 \text{ ps}$ (或 $\pm 10 \text{ ps}$)。

光探针 Faraday 偏振旋转测量系统由两块偏振方向正交的偏振片、成像显微物镜 ($f=65.3 \text{ mm}$) 和记录底片组成。当激光照射靶面时, 相对迟后穿过等离子体冕区的探针光在沿其光轴方向的自生磁场的的作用下, 偏振面发生旋转。探针光偏振面的旋转角取决于自生磁场的强度和电子密度的分布

$$\varphi(y, z) = \frac{e}{2mc^2} \int_{-a}^a \frac{n_n}{n_c^2} \mathbf{B}(r, z) \cdot d\mathbf{x} \quad (1)$$

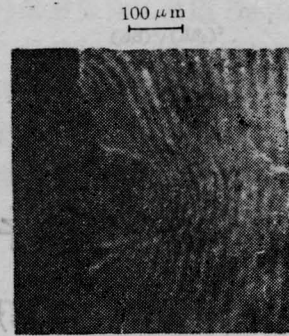
式中 $\frac{e}{m}$ 是电子的荷质比, $n_c^2 = 2.8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 是探针光 (沿 x 轴入射) 的临界密度, $\mathbf{B}(r, z)$ 为绕主激光光轴 (z 轴) 顺时针旋转的环状自生磁场, $2a$ 是探针光所透过的等离子体厚度。

实验上, 我们利用 ILFORDHp5 (27D°) 胶片作为感光底片。对这种胶片进行定标, 然后对自生磁场的 Faraday 偏振旋转光在底片上曝光的亮斑作定量分析, 即可得到旋转角。

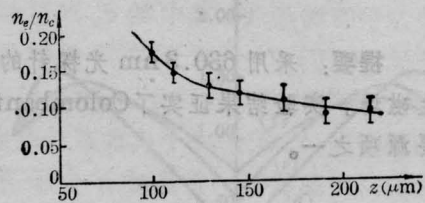
确定 Faraday 旋转角后, 还需确定相应的电子密度分布。由于 $\phi 1 \text{ mm}$ 的铜柱状靶相对于主激光光焦斑 ($\phi 80 \mu\text{m}$) 可视为平面靶, 所以我们可假设靶上等离子体电子密度呈球形分布^[1, 2]:

$$n_e = n_0 e^{-(R-R_0)/L} \quad (2)$$

其中原点在靶上, R_0 为临界密度面的半径, n_0 为临界密度处低密度台阶上的电子密度^[3]



(a) 干涉图



(b) 轴向电子密度分布

图 1

($=0.4n_c$), L 为低密度台阶的密度标称长度。 R_0 可从公式 $R_0 = C_s \Delta t$ 中计算出来, C_s 为离子声速 ($\sim 1.4 \times 10^7 \text{ cm/s}$), Δt 为探针光相对于主激光脉冲峰值的延迟时间; L 可从铜柱靶的电子密度分布 (图 1) 中得到, $L = 66 \sim 83 \mu\text{m}$ 。确定 Faraday 旋转角 φ 分布和相应电子密度分布后, 根据 (1) 式便可得到自生磁场的空间分布。

三、结果分析

实验发现: 自生磁场在激光脉冲峰值刚过 ($\Delta t = +5 \text{ ps}$) 时开始出现 (图 2(a), 图 3(a)), 这时自生磁场的幅度不大 ($\sim 0.1 \text{ MG}$), 空间范围较小。随着时间的推移, 自生磁场的幅度和空间范围逐渐增大; 到 $\Delta t = 71 \text{ ps}$ (主激光脉冲期间), 自生磁场达到最大值 0.3 MG (图 2(b), 图 3(b))。随后, 自生磁场幅度缓慢地减小, 到 $\Delta t = 138 \text{ ps}$ (激光脉冲尾部), 自生磁场幅度减小到 0.25 MG , 但空间范围继续增大 (图 2(c), 图 3(c))。

根据以 $\nabla n_e \times \nabla T_e$ 机制为主的理论模型

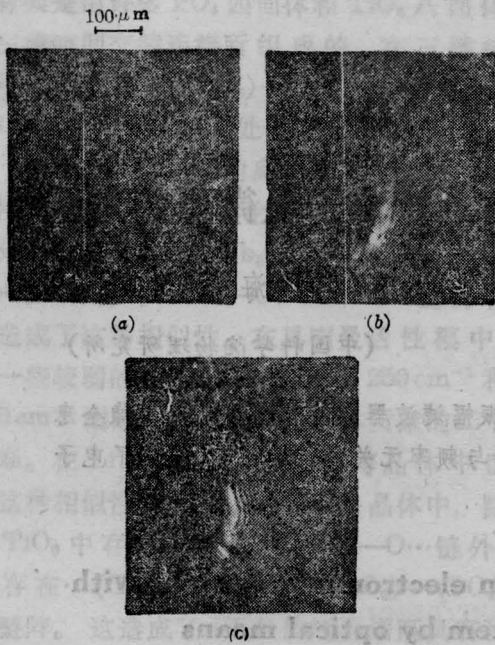


图 2

(a) $\Delta t = 5$ ps, (b) $\Delta t = 71$ ps; (c) $\Delta t = 138$ ps
 相对延迟精度: ± 10 ps;

推导出来的饱和自生磁场公式^[7], 可计算在本实验条件下自生磁场的最大值:

$$B_M = 3.3 \left(\frac{T_e}{1 \text{ keV}} \right)^{1/2} \left(\frac{10 \text{ m}}{L \mu\text{m}} \right) \left(\frac{A}{z+1} \right)^{1/2} = 0.45 \text{ MG}$$

其中电子温度 $T_e = 500 \pm 50$ eV, 密度标长 $L = 75 \mu\text{m}$ ($\Delta t = 71$ ps), 铜原子 $A = 63.5$, $z = 29$ 。根据该模型, 自生磁场最大值应位于主激光焦斑边缘。但是, 实验获得的最大值 (0.3 MG) 小于这个计算值; 而且最大值也不位于激光焦斑边缘, 而是远离焦斑 ($r = 140 \mu\text{m}$ (相对于焦斑半径 $40 \mu\text{m}$)。实际上早在 1978 年, Stamper^[2] 也观察到这一现象。不同的是他在主激光 (10^{16} W/cm^2) 脉冲前 2 ns 加上一个预脉冲 (3% 主激光能量)。预脉冲效应使自生磁场的空间范围增大, 使自生磁场的最大值幅度下降。在这种情况下, 自生磁场的解释仍然停留在 $\nabla n_e \times \nabla T_e$ 机制上。

本实验观察到的自生磁场发生上述那些现象显然不是由于预脉冲效应引起的。那么, 是什么原因导致自生磁场最大值及其位置与

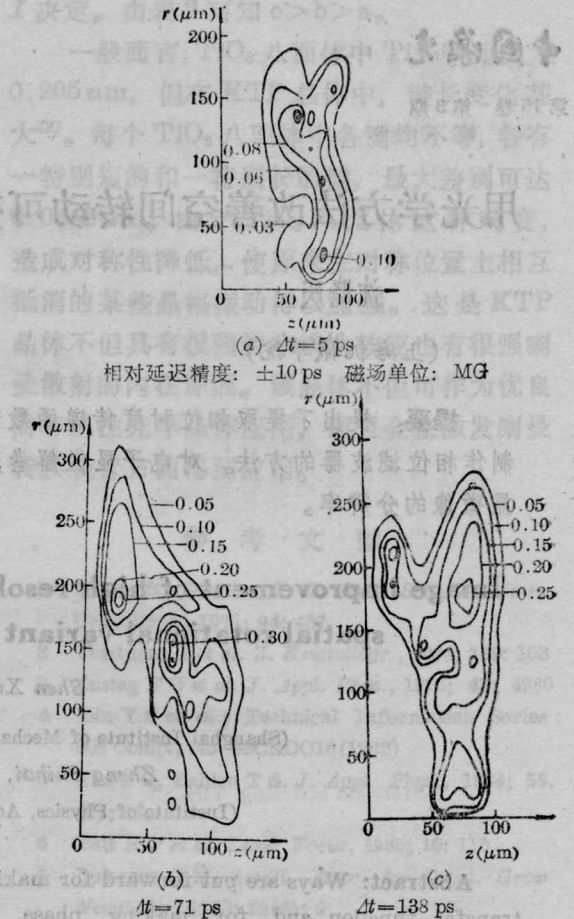


图 3

$\nabla n_e \times \nabla T_e$ 机制预计的结果不同呢? 我们利用 Colombant 提出的“热力源”机制进行分析, 获得比较满意的解释。当等离子体存在着温度梯度时, 沿温度梯度方向的与逆温度梯度方向的电子-离子间摩擦力不平衡, 这种不平衡造成的力称为“热力”, 其方向与温度梯度相反。作为生成自生磁场的源项之一, “热力”可拉平电子的温度梯度, 从而使自生磁场的最大值降低、空间范围增大。下表为本实验结果与“热力源”理论模拟结果的比较。

比较结果表明, 考虑“热力源”后, 模拟结果得到的自生磁场最大值相对下降的幅度、空间范围的相对增大值以及最大值出现的时刻都与本实验结果吻合。因此可以认为, Colombant 提出的“热力源”机制是生成自生

已使 CV 的激光输出在 620.0→650.0 nm 间增强了 4 倍左右。此外,在 Rh6G+CV 混合溶液中,当 Rh6G 浓度为 $2 \times 10^{-3} \text{ M}$, CV 浓度为 $2.7 \times 10^{-4} \text{ M} \sim 3.5 \times 10^{-4} \text{ M}$ 时,我们同时获得了 Rh6G 在 575.0 nm, CV 在 624.0 nm 附近的黄、红两色激光振荡,其中黄色激光的可调谐范围为 571.0→588.0 nm,红色激光的调谐区域为 622.0→640.0 nm,关于此结果我们将另文详述。

根据上述实验结果,可以归纳出以下结论:(1)采用混合染料可以拓宽染料激光器的激光可调谐范围。(2)利用混合染料中的各种能量转移过程,不仅可使某些染料的激光输出在一定波长范围内增强,而且还可能使那些在 N_2 激光泵浦下不能出激光的染料,在混合染料液中实现激光振荡,这样就降低了染料激光器对泵浦源的要求。(3)在混合染料液中可获得较强的双波长和多波长可调谐激光输出,这在双光子共振激光光谱、激光大气检测中是很有用的。

实验中所用的 N_2 激光器是上海市激光

所生产的 7112 型 N_2 激光器:染料 Rh6G、RhB 分别由北京化工厂和广州化学试剂厂出品, CV 是德国产品;摄谱采用北京教学仪器厂的小型摄谱仪,用天津感光胶片厂生产的红快型干板记录。

本工作得到了李月华同志的大力支持,实验中林理忠同志和我们进行了有益的讨论,曾昭权同志提供了部分染料,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Moeller C E *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1971; **18**: 278
- 2 Lin C *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1973; **44**: 5050
- 3 Kenney-Wallace *et al.* *Chem. Phys. Lett.*, 1975; **32**: 71
- 4 Ahmed S A *et al.* *J. Chem. Phys.*, 1974; **61**: 1584
- 5 Terada M *et al.* *Japan J. Appl. Phys.*, 1983; **22**: 1392
- 6 Unnikrishana N V *et al.* *Opt. Acta*, 1984; **31**: 983
- 7 Lu P Y *et al.* *Phys. Rev. A*, 1982; **26**: 3610
- 8 Lu P Y *et al.* *Phys. Rev. A*, 1983; **27**: 2100
- 9 Kleinerman M *et al.* *Opt. Commun.*, 1978; **26**: 81
- 10 Schäfer F P. *Dye Lasers*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1977: 174

(上接第 155 页)

结果比较		"热光源"模拟结果	本实验结果
1	实验条件	主激光功率 10^{16} W/cm^2	主激光功率 $3 \sim 4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$
		脉 宽 21 ps (FWHM)	脉 宽 200ps (FWHM),
		焦斑半径 12 μm	焦斑半径 40 μm
2	不考虑热光源	$B_M = 2.5 \text{ MG}$	$B_M = 0.45 \text{ MG}$
	考虑热光源	$B'_M = 1.3 \text{ MG}$	$B'_M = 0.3 \text{ MG}$
3	不考虑热光源	$\Delta t = 18 \text{ ps}$ 出现 B_M	
	考虑热光源	$\Delta t = 62 \text{ ps}$ 出现 B_M	$\Delta t = 71 \text{ ps}$ 出现 B'_M
4	考虑热光源	约 100 μm	约 300 μm
	时自生磁场的空间范围	(相对焦斑半径 12 μm)	相对焦斑半径 40 μm)

磁场的机制之一。

参 考 文 献

- 1 Stamper J A, Ripin B H. *Phys. Rev. Lett.*, 1975; **34**: 138
- 2 Stamper J A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1978; **40**: 1177
- 3 Hass R A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1976; **37**: 489
- 4 Rilrenny J D *et al.* Rutherford Laboratory Report RL-79-036, 4.10-4.13(1979)
- 5 Boyd T J M *et al.* *Phys. Lett.*, 1982; **88A**: 140
- 6 Max C E *et al.* *Phys. Fluids*, 1978; **21**: 128
- 7 Raven A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1978; **41**: 554
- 8 Colombant D G, Winsor W K. *Phys. Rev. Lett.*, 1977; **38**: 697
- 9 Raven A, Willi O. *Phys. Lett.*, 1979; **43**: 278