

文章编号: 1001-4322(2004)05-0593-04

飞秒激光与固体靶相互作用中自生磁场的测量*

焦春晔^{1,2}, 谷渝秋², 张保汉², 郑志坚², 杨向东¹,
蔡达峰^{1,2}, 周维民², 温天舒², 王光昶^{1,2}, 陈 豪^{1,2}

(1. 四川大学 原子分子物理研究所, 四川 成都 610065; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 利用 OMA 光学多道分析谱仪, 分别在激光镜反方向和接近靶面法线方向测量了 2 倍频谐波的精细结构。在激光功率密度为 $5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 的条件下, 通过散射光 2 倍频谐波谱的精细结构, 回推出激光与等离子体相互作用中产生的自生磁场达 100 T 量级。

关键词: 自生磁场; OMA 谱仪; 2 倍频谐波; 飞秒激光等离子体

中图分类号: O434.12 **文献标识码:** A

随着惯性约束聚变快点火概念的提出, 超短超强激光脉冲与等离子体的相互作用成为激光等离子体物理研究的热点之一。在强激光脉冲与固体靶相互作用过程中有强的自生磁场^[1]产生, 自生磁场对高能粒子的输运、等离子体尾流加速、能量吸收、电子及离子的动力学行为、等离子体膨胀等多方面都有很大的影响。

自 J. A. Stamper 首先对自生磁场进行了实验研究^[2]以来, 人们在理论(数值分析)^[3,4]和实验上对其进行有益的探索, 结果表明: 超强激光与固体靶相互作用中, 在过密和次密等离子体区可以产生高达 10^4 T 的自生磁场。在激光等离子体中, 由于自生磁场产生于高密度的等离子体中, 产生的空间尺度极小, 且具有不均匀、短寿命的特点, 因此实验诊断非常困难。目前, 主要实验诊断方法有磁探针、电流探针、磁带记录、Faraday 旋转、Zeeman 分裂等^[2]。Y. T. Li^[5]利用飞秒激光等离子体背向散射光的 Faraday 效应, 在靶面功率密度为 10^{15} W/cm^2 的条件下, 测到对应的轴向平均磁场达百 T 量级。英国 Blackett 实验室和 Rutherford Appleton 实验室在激光功率密度大于 10^{19} W/cm^2 , 0.7 ~ 1 ps 脉冲宽度, 激光与塑料靶相互作用中, 利用谐波极化面测量的方法^[6], 测得在临界密度 n_c 附近的自生磁场在 $(3.4 \sim 4.6) \times 10^4 \text{ T}$ 之间。M. Borghesi, J. R. Davies 和 A. Pukhov 等人^[7]以及 L. Gremillet 等人^[8]于 1999 年通过实验观察到了自生磁场准直的超热电子向靶内的输运。E. L. Clark 等人于 2000 年在强度约 $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 的激光与高密度等离子体相互作用实验中测量了能量高达 18 MeV 的高能质子的角偏折, 并认为质子的角偏折是由于等离子体中的强烈的自生准静态磁场作用的结果, 且由此推导出磁场高达 $3.0 \times 10^3 \text{ T}$, 该自生磁场源于实验中观察到的快电子的运动^[9]。

众所周知, 激光与等离子体相互作用将产生高次谐波^[10]。根据文献[11]的模拟, 超强激光等离子体相互作用中强磁场引起高次谐波谱出现精细结构, 通过测量谐波谱的精细结构可以推断磁场的大小, 并给出谐波谱测量自生磁场的 PIC 模拟结果。该方法和法拉第旋转法相比, 不需要外加探针光系统。本文通过实验测得 2 倍频谐波谱的精细结构, 回推出激光与等离子体相互作用中产生的自生磁场的大小, 并与理论模拟结果作了比较。

1 实验原理

超强激光与固体靶相互作用时, 在临界面附近将产生大量的快电子并向靶内输运, 产生准静态磁场, 同时, 在这个区域内会产生谐波^[10,12]。在强自生磁场作用下, 电子作“8”字形 Quiver 运动和回旋漂移的耦合运动^[11], 这种耦合运动可引起谐波发射出现伴线结构。

在电磁场中电子的运动方程为

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{e}{m} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \left[\mathbf{E}_0 + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times (\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}) - \frac{1}{c^2} \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}_0) \right] \quad (1)$$

* 收稿日期: 2003-11-04; 修订日期: 2004-03-01

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题(2000Z0206); 国家自然科学基金项目资助课题(10275057; 10275056)

作者简介: 焦春晔(1978 →), 女, 硕士生, 主要从事超短超强激光与物质相互作用研究。

杨向东(1943 →), 男, 教授, 博导, 主要从事原子分子物理理论, 第一作者导师。

张保汉(1963 →), 男, 研究员, 第一作者导师。

式中: m 为电子静止质量; $E_0 = E_0 \cos(k_0 z - \omega_0 t) e_x$, $B_0 = B_0 \cos(k_0 z - \omega_0 t) e_y$ 分别是光波的电场和磁场; 静磁场 $B = B e_y$; ω_0, k_0 分别是波的频率和向量。定义 \bar{v} 是电子平均速度, 对上面方程在“8”字形轨迹上取平均, 近似得

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{e}{mc} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \bar{v} \times B \quad (2)$$

由非微扰运动理论, $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ 的值可估计为 $[1 + (eE_0/m\omega_0 c)^2/2]^{-1/2}$ 。定义 $\gamma = [1 + (eE_0/m\omega_0 c)^2/2]^{1/2}$, 根据方程(2)容易得出: 平均速度以回旋频率 eB/mc 振荡。回旋漂移运动和“8”字形 Quiver 运动的耦合引起谐波附近产生边带效应, 其频率间隔近似等于 eB/mc , 其数值方程为

$$\text{Hz} = \frac{1.76 \times 10^{15} B/T}{[1 + (\frac{I}{W \cdot \text{cm}^{-2}}) (\frac{\lambda}{\mu\text{m}})^2 / (2.74 \times 10^{18})]^{1/2}} \quad (3)$$

由此可见, 测得谐波频率间隔, 可以回推激光与等离子体相互作用中产生的自生磁场大小。

2 实验

本实验在中国工程物理研究院的 20TW 掺钛蓝宝石激光器上进行。激光器采用啁啾脉冲放大(CPA)技术, 其主要参数为: 主激光波长 800nm, 重复频率 10Hz, 脉冲宽度 60fs, 激光能量 530mJ (压缩前)。

2.1 实验布局

实验布局如图 1 所示, 圆柱形靶室壁上有一个法兰, 通过法兰口将压缩后的激光引入靶室。镀膜反射镜将压缩后光束直径为 $\phi 70\text{mm}$ 的激光引到 $f/5$ 的离轴抛物面镜上, 抛物面镜再将此激光束聚焦在靶面上。靶架由一个 5 维步进电机控制, 确保每发激光能够打在靶面的不同位置。抛物面镜由一个 3 维步进电机控制, 用于调节激光的聚焦。在靶室外用一台长工作距离显微镜监测激光的聚焦状态, 确保每一发激光都处于好的聚焦状态。

实验采用铜膜靶, 厚度分别为 15 和 20 μm 。采用针孔配合 X 射线 CCD 测量激光焦斑, 所测焦斑直径约为 $\phi 35\mu\text{m}$ (FWHM), 如图 2 所示。

在靶室外放置高分辨率 (0.1nm) 的 OMA 光学多道分析谱仪, 分别在入射激光在靶面的反射方向 (以下称入射激光反射方向) 和接近靶面法线的方向进行测量。2 倍频散射光由空间分辨装置 (消色差的光学镜头) 引到 OMA 谱仪的狭缝上, 再通过狭缝进入谱仪内部的反射光栅上产生色散, 色散后的光经过一块反射镜将狭缝像成像于输出窗口, 输出端配上 CCD 相机, 由计算机来记录光谱。

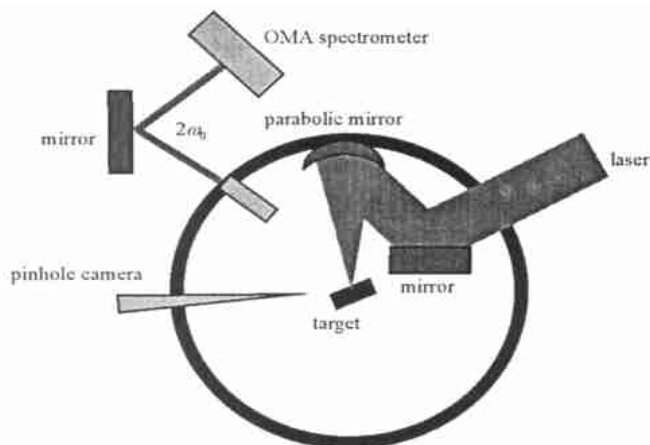
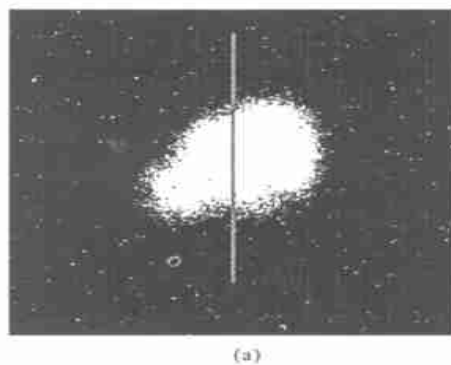
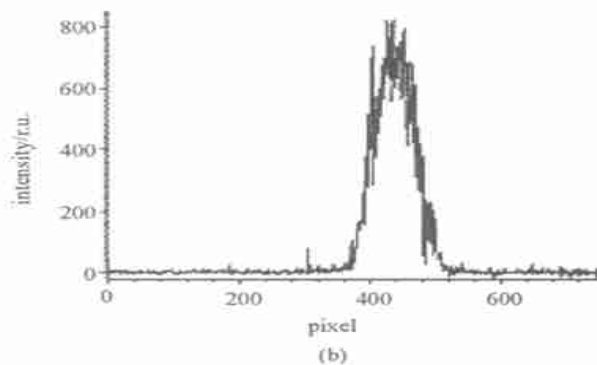


Fig. 1 Scheme of the experimental setup

图 1 实验布局简图



(a)



(b)

Fig. 2 Image of laser focus and scan profile

图 2 激光焦斑和扫描图

实验中激光与靶法线成 40° 射到薄膜靶面上, 探测设备分别放置在接近靶法线方向 (OMA 光学多道分

析谱仪放在与靶法线成 5° 角的位置)和激光反射方向。

2.2 实验结果

实验参数是:激光能量(压缩前)为 530mJ,脉宽 60fs,主激光波长 800nm,靶面激光峰值功率密度约为 $4.6 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 。图 3(a)为在接近靶法线方向、靶厚 15 μm Cu 膜条件下测得的 2 倍频散射光谱在 CCD 上的面阵图像,水平方向为散射光谱波长方向,垂直方向为一维空间方向;图 3(b)为(a)中对应空间位置处的线阵图像,其光谱出现伴线结构。图 4(a)是在入射激光反射方向、靶为 20 μm Cu 膜条件下测得的 2 倍频散射光谱在 CCD 上的面阵图像,水平方向为散射光谱波长方向,垂直方向为一维空间方向;图 4(b)为(a)中对应空间位置处的线阵图像,其光谱出现伴线结构。图 3(b)和图 4(b)中光谱的波长平均间隔()分别为 3.183 和 3.862nm,代入公式(3)推算出的激光与物质相互作用中产生的等离子体内的自生磁场分别约为 200 和 270T。由于实验中每发飞秒激光的焦斑可能不同,造成打靶激光功率密度的不同以及磁场的空间分布的不均匀,使得两个方位测量的磁场大小也不同。

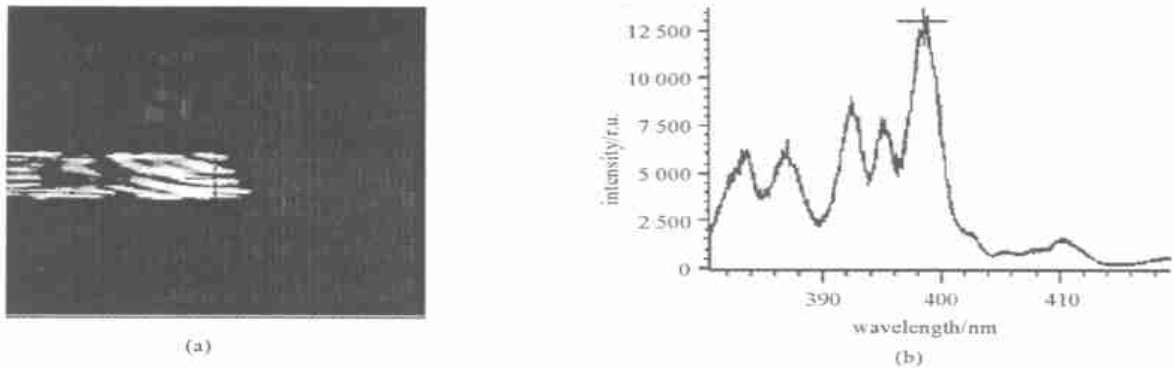


Fig. 3 2 doubling scattering spectrum at near normal direction

图 3 在接近法线方向测得的空间分辨谱

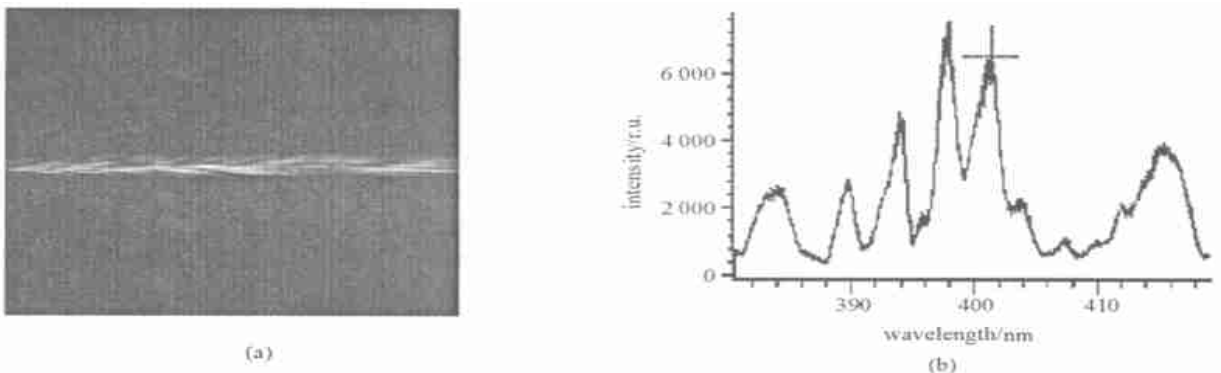


Fig. 4 2 doubling scattering spectrum at near reflection

图 4 在反射方向测得的空间分辨谱

3 分析和结论

本实验分别在接近法线方向和入射激光的反射方向进行了测量,在靶面功率密度约为 $5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 情况下,观察到 2 倍频散射光谱的精细结构,反推出激光与固体靶相互作用中产生的等离子体内的自生磁场达百 T 量级。文献[11]的模拟结果指出:在激光峰值功率密度 $I = 1.0 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$, $r = 1\mu\text{m}$ 的条件下,产生的自生磁场为 500T。而文献[5]在激光脉宽 150fs,输出能量 5mJ,重复频率 10Hz,波长 800nm,靶面功率密度约为 $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 条件下,利用法拉第旋转的方法测得铝飞秒激光等离子体背向散射光偏振面相对于入射激光的偏振面发生了 2° 的偏转,对应的平均磁场达百特斯拉量级。我们的实验中激光峰值功率密度只达到 $5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$,利用 2 倍频散射光谱的精细结构反推出激光与等离子体相互作用产生的自生磁场达 100T 量级。在激光与等离子体相互作用过程中,高次谐波产生于临界面附近,因此通过高次谐波谱的特征推断出的磁场反映了临界面附近自生磁场的大小。磁场的大小与激光的靶面功率密度有关,在不同的靶面功率密度下,激光与靶

的作用机制不同,产生的磁场也不同。

实验中激光功率密度达 $5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$, 由于相对论效应和有质动力 ($V \times B$) 会引起自相位调制 (self-modulation)^[13], 自相位调制可能使入射激光的频率谱展宽, 但不会引起 2 倍频散射光谱出现精细结构, 文献[13] 对自相位调制有更详细的研究。

参考文献:

- [1] Haines M G. Saturation mechanisms for the generated magnetic field in nonuniform laser-matter irradiation[J]. *Phys Rev Lett*, 1997, **78**: 254—257.
- [2] Stamper J A. Review on spontaneous magnetic fields in laser-produced plasmas: phenomena and measurements[J]. *Laser and Particle Beams*, 1991, **9**: 841—862.
- [3] Wilks S C, Kruer W L, Tabak M, et al. Absorption of ultra-intense laser pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**: 1383—1386.
- [4] Mason R J, Tabak M. Magnetic field generation in high-intensity-laser-matter interactions[J]. *Phys Rev Lett*, 1998, **80**: 524—527.
- [5] 李玉同, 张杰, 陈黎明, 等. 超短脉冲激光与等离子体相互作用中产生的轴向磁场的测量[J]. 中国科学(A 辑), 2000, **11**: 1040—1045. (Li Y T, Zhang J, Chen L M, et al. The measurement of the axial magnetic field in plasmas produced by femtosecond laser pulses[J]. *Science in China (series A)*, 2000, **11**: 1040—1045)
- [6] Tatarakis M, Gopal A, Watts I, et al. Measurements of ultrastrong magnetic fields during relativistic laser-plasma interactions[J]. *Physics of Plasmas*, 2002, **9**: 2244—2250.
- [7] Borghesi M, Mackinnon A J, Bell A R, et al. Observations of collimated ionization channels in aluminum-coated glass targets irradiated by ultraintense laser pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**: 4309—4312.
- [8] Gremillet L, Amiranoff F, Baton S D, et al. Time-resolved observation of ultrahigh intensity laser-produced electron jets propagating through transparent solid targets[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**: 5015—5018.
- [9] Clark E L, Krushelnick K, Davies J R, et al. Measurements of energetic proton transport through magnetized plasma from intense laser interactions with solids[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**: 670—673.
- [10] Burgess M D J, Dragila R, Davies B L. Complex second harmonic spectra from plasmas produced using short pulse, high intensity, $1 \mu\text{m}$ laser radiation[J]. *Opt Commun*, 1984, **50**: 236—240.
- [11] Zheng J, Tanaka K A, Sentoku Y, et al. Harmonic emission with cyclotron satellite structure due to strong magnetic fields produced by ultra-intense laser-plasma interaction[J]. *Physics of Plasmas*, 2002, **9**: 3193—3196.
- [12] Bobin J L, Decroisette M, Meyer M, et al. Harmonic generation and parametric excitation of waves in a laser-created plasma[J]. *Phys Rev Lett*, 1973, **30**: 594—597.
- [13] Max C E, Arons J. Self-modulation and self-focusing of electromagnetic waves in plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 1974, **33**: 209—212.

Measurement of spontaneous magnetic field in the interactions of femtosecond laser with solid targets

JIAO Chun-ye^{1,2}, GU Yu-qiu², ZHANG Bao-han², ZHENG Zhi-jian², YANG Xiang-dong¹,
CAI Da-feng^{1,2}, ZHOU Wei-min², WEN Tian-shu², WANG Guang-chang^{1,2}, CHEN Hao^{1,2}

(1. Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China)

Abstract: The experiment measured the fine spectrum structure of 2 doubling harmonic at near normal direction of target and reflection direction of laser wave, employing OMA optical multi-channel spectrometer. Under the intensity of $5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$, the result of measurement indicates that spontaneous magnetic field was up to 10^2 T level by analyzing the fine structure of 2 doubling harmonics in laser-plasma interaction.

Key words: Spontaneous magnetic field; OMA spectrometry; 2 doubling harmonics; Femtosecond laser-plasma