

文章编号: 0258-7025(2006)01-0039-04

一种进行激光等离子体通道实验的设计

方智恒¹, 王琛¹, 王伟¹, 孙今人¹, 郑无敌², 傅思祖¹, 顾援¹, 王世绩¹

(¹ 上海激光等离子体研究所, 上海 201800; ² 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要 利用一束激光产生等离子体通道, 进而使点火激光能顺利到达高密度区是快点火理论中实现点火的一个重要过程。提出了一种利用神光 II 的二路装置产生通道的设计。该设计将其中一路长脉冲激光(350 ps, 1.053 μm) 辐照靶箔产生等离子体, 用另一路短脉冲激光(1 ps, 1.053 μm) 在上述预等离子体中打通道, 并将后者的一部分激光经分离和四倍频(0.263 μm) 后作探针光, 采用 Normaski 型偏振干涉系统对通道等离子体电子密度分布进行干涉诊断测量的实验研究设计。

关键词 激光物理; 激光诊断; 激光通道; Normaski 型偏振干涉; 超强超短激光

中图分类号 O 53; TL 632+.1 **文献标识码** A

An Experimental Design of the Laser Plasma Channeling

FANG Zhi-heng¹, WANG Chen¹, WANG Wei¹, SUN Jin-ren¹,
ZHENG Wu-di², FU Si-zu¹, GU Yuan¹, WANG Shi-ji¹

¹ Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai, 201800, China

² Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100088, China

Abstract It is important in fast ignition (FI) to drill a channel in the coronal plasma by a long intense pulse firstly, since we expect the following ultra-intense pulse will reach more easily the dense core to obtain the fuel burning. An experimental design to study the plasma channeling was presented at two beams laser sub-picosecond (SPS) Facility of National Laboratory of High Power Laser and Physics. One beam with 1.053 μm and 350 ps full width at half maximum (FWHM) was used to form the pre-plasma. And then, a most part of another one with the same wavelength and 1 ps FWHM was focused on the plasma for channeling. The rest part of the 1 ps laser beam, frequency quadrupled to $\lambda=0.263 \mu\text{m}$, was as a probe used in Normaski polarization interferometry to diagnosis the electron density distribution of the channel.

Key words laser physics; laser diagnosis; laser channeling; Normaski polarization interferometry; ultra-short intense laser

1 引言

自从 1994 年 Tabak 等提出“快点火”模型以来, 激光等离子体通道成为快点火研究关心的一个重要课题。由于受到激光器以及诊断方法的限制, 目前对通道的形成、内部结构及其演化等物理过程还没有深入细致的研究, 而激光等离子体通道的这些物理特性将直接关系到超短点火激光脉冲在等离子体中的运输和传播。本文主要针对神光 II 的二路装置, 提出了一种利用短脉冲激光产生通道并对通道等离子体电

子密度分布进行干涉测量的实验研究设计。

2 等离子体通道的产生机理

激光等离子体通道的形成与有质动力、空间电场、相对论自聚焦、等离子体加热等密切相关, 其中相对论自聚焦与有质动力对通道形成和演化起着主导作用^[1~6]。

由线性理论得到的激光相对论自聚焦阈值为

$$P_c = 17(n_c/n_e) \text{ GW}, \quad (1)$$

收稿日期: 2005-05-20; 收到修改稿日期: 2005-07-08

作者简介: 方智恒(1980—), 男, 中国工程物理研究院硕士研究生, 主要从事激光等离子体相互作用的研究。E-mail: smallfang2000@hotmail.com

式中 n_e 为电子密度, 当 $n_e = 0.05n_c$ 时, $P_c = 340$ GW; 当 $n_e = 0.1n_c$ 时, $P_c = 170$ GW。神光 II 二路装置短脉冲激光具有 10 TW 的输出能力, 在 n_e 等于 $0.05n_c \sim 0.5n_c$ 范围内, 激光功率密度远高于自聚焦阈值。

有质动力推动电子离开高场压区, 它与电场关系为^[7]

$$\mathbf{F}_p = -\frac{e^2}{4m_e\omega^2} \nabla E^2(\mathbf{x}), \quad (2)$$

对于高斯光束

$$|\mathbf{E}| = \sqrt{I_0} e^{-\frac{x^2+y^2}{r^2(z)}}, \quad (3)$$

由(2), (3)可知, 有质动力正比于激光的功率密度 I_0 , I_0 越大则从高场压区排开电子的力也就越大, 当 $I_0 > 10^{18}$ W/cm², 就会形成等离子体通道^[2]。二路装置短脉冲在最佳聚焦状态下(焦斑 15 μm), 功率密度可达 5.7×10^{18} W/cm²。综上分析, 二路装置有能力进行等离子体通道实验。

3 等离子体通道的产生及其诊断测量的实验设计

等离子体通道物理实验研究至少需要两束激光, 其中一路用于产生预等离子体, 对激光功率密度要求比较低, 一般达到 10^{12} W/cm² 即可; 另一路作用于预等离子体上, 形成等离子体通道, 对于这路激光, 要求其功率密度很高 ($> 10^{18}$ W/cm²)。二路激光装置能输出一路长脉冲: 10 J, 350 ps, 焦斑最小为 30 μm , 此时激光功率密度达到了 4×10^{15} W/cm², 实验中为了获得比较均匀的等离子体, 可离焦使用, 降低其功率密度; 另一路短脉冲: 10 J, 1 ps, 焦斑最小 15 μm , 激光功率密度为 5.7×10^{18} W/cm²。图 1 是在二路装置上进行等离子体通道实验的设计排布

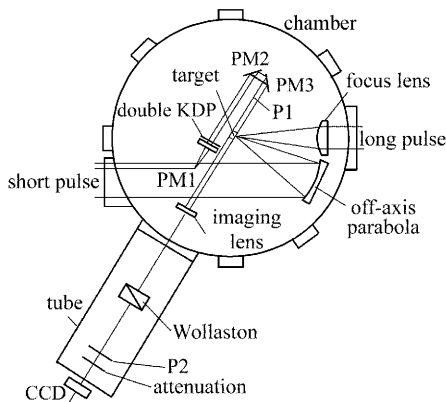


图 1 等离子体通道实验元件排布设计

Fig. 1 Schematic of the experiment arrangement

图。长脉冲激光从靶室右侧窗口经会聚透镜聚焦到靶上产生预等离子体, 经过一定的延时后, 短脉冲激光从左侧窗口进入靶室, 经离轴聚焦镜会聚后, 作用于预等离子体上形成激光等离子体通道。平面反射镜 PM1 在短脉冲激光会聚前的光路上截取其一小部分, 并经双 KDP 晶体四倍频后形成激光探针。该激光探针经平面镜 PM2, PM3 改变方向后穿越等离子体, 并最终进入由起偏器 P1, 成像镜, 沃拉斯顿棱镜, 检偏器 P2, CCD 组成的 Normaski 型偏振干涉系统, 进行等离子体通道的诊断。平面镜 PM2, PM3 固定于同一平移台上, 通过调节平移台可改变探针光到达通道的时间延迟, 从而实现对不同时刻通道状态的诊断。

所谓激光等离子体通道即指通道内的等离子体电子密度出现陡然下降, 而利用激光探针法对等离子体电子密度分布进行测量, 这是一种直接有效的诊断方法, 它不受原子参数和理论模型的影响。激光探针诊断方法又可以分为干涉法、偏折法和阴影法等, 它们分别是利用探针光束穿过等离子体后的相位、角度和强度的变化信息来推算等离子体电子密度变化情况。其中只有激光探针干涉法能直接给出等离子体电子密度的绝对分布。

用于激光探针干涉法的干涉系统有偏振干涉仪、全息干涉仪和波面剪切干涉仪^[8]。与后两种干涉仪相比, 偏振干涉仪^[9]有三个优点: 1) 结构简单, 光路准直方便, 稳定性高; 2) 物光和参考光严格等光程, 适合于脉冲很窄的探针光; 3) 其空间分辨率主要取决于成像物镜的质量, 因而容易提高利用率。由于皮秒激光产生的通道的演化速度非常快, 通道半径扩展速度超过 10^8 cm/s^[1], 为了有效地“冻结”通道电子密度轮廓的变化, 激光探针脉宽需要在皮秒量级, 因此用偏振干涉仪最为合适。二路装置短脉冲激光脉宽为 1 ps, 直接从中分离出一部分即得到了窄脉冲的激光探针。本方案设计采用图 2 所示的 Normaski 型偏振干涉仪, 它由起偏器 P1, 成像镜 L, 沃拉斯顿棱镜及检偏器 P2 等元件组成。图 2 中 λ 为探针激光波长, 物点 O 即为待测等离子体, ϵ 为

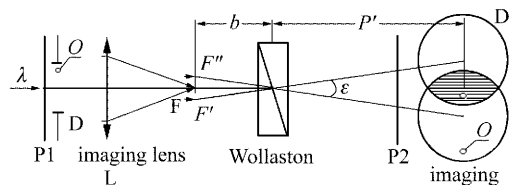


图 2 Normaski 型偏振干涉仪示意图

Fig. 2 Schematic of Normaski polarization interferometry

光线经过沃拉斯顿棱镜后的分束角。

采用波长较短的激光探针,一方面可穿越密度更高的等离子体,从而提高其可测量的密度极限,另一方面可减少因电子密度变陡引起的探针光在等离子体中的折射效应,从而提高其可测量电子密度的深度。Jahoda 等^[10]估算平行入射的探针光束在球对称等离子体中的平均偏角为

$$\alpha = 2.2 \times 10^{-14} n_e \lambda_p L / l, \quad (4)$$

式中 λ_p 为激光探针波长, L 为探针光所穿越的等离子体有效长度, l 为等离子体密度梯度尺度。由(4)式可见,探针光波长 λ_p 越短,其穿越等离子体后的折射效应越小。为此,实验设计中采用 $1.053 \mu\text{m}$ 激光的四倍频作为探针光,并用软 X 光 CCD 接收记录。考虑各种衰减后,当四倍频效率达到 5×10^{-4} 时,在 CCD 上就可接收到足够强度的探针信号。故采用激光破坏阈值较高的双 KDP 晶体即可满足激光探针的强度要求。

诊断实验中条纹宽度的选择非常重要, Normaski 型干涉仪可方便地实现条纹宽度的调节。如图 2 所示,当成像镜位置确定后,焦点 F 到沃拉斯顿棱镜距离 b 和棱镜到接收面的距离 P' 之和为常数;分束角 ϵ 由棱镜材料和切割角度决定;条纹宽度 d 为

$$d = \left\{ \frac{4\lambda^2 \left[\left(b \cdot \tan \frac{\epsilon}{2} \right)^2 + (b + P')^2 \right] - \lambda^4}{(16D^2 - 4\lambda^2)} \right\}^{1/2} \approx \frac{\lambda \cdot (b + P')}{2b \cdot \tan \frac{\epsilon}{2}}, \quad (5)$$

由(5)式可知,通过调节 b 的大小就可改变接收面上的干涉条纹宽度。考虑软 X 光 CCD 单个像素为 $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$,为了清晰分辨条纹,实验中设计像面条纹宽度 d 为 $400 \mu\text{m}$,对应到物面,条纹宽度为 $57 \mu\text{m}$ 。

4 理论计算

针对神光 II 二路装置的输出激光条件,利用一维非平衡辐射流体力学程序——JB19 对激光打靶后形成的电子密度分布进行了计算。图 3 给出了 JB19 程序计算长脉冲激光打 CH 靶 1.9 ns 后,预等离子体电子密度沿靶面法向的分布。程序模拟条件为:激光波长 $1.053 \mu\text{m}$,此长脉冲激光具有预脉冲,预主脉冲时间间隔 3.0 ns ,强度比 10% ,脉冲宽度均

为 350 ps ,主脉冲能量 3 J ,焦斑直径 $100 \mu\text{m}$ 。考虑到等离子体膨胀的二维效应,在与靶面平行方向,其形成的电子密度分布如图 4 曲线 a 所示。此时,若短脉冲激光作用到预等离子体上,就会形成通道,在与靶面平行方向,电子密度分布如图 4 曲线 b 所示。

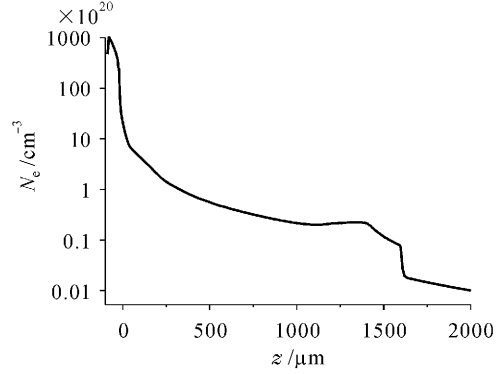


图 3 靶面法向电子密度分布

Fig. 3 Density profile vertical target

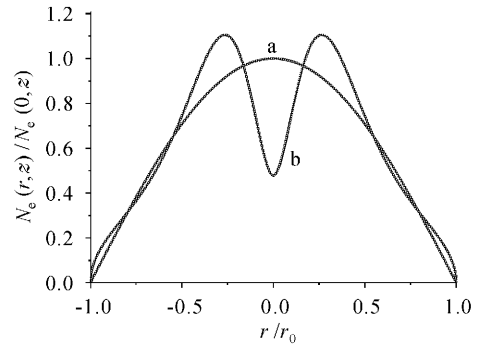


图 4 等离子体柱径向电子密度分布

Fig. 4 Radial density profile

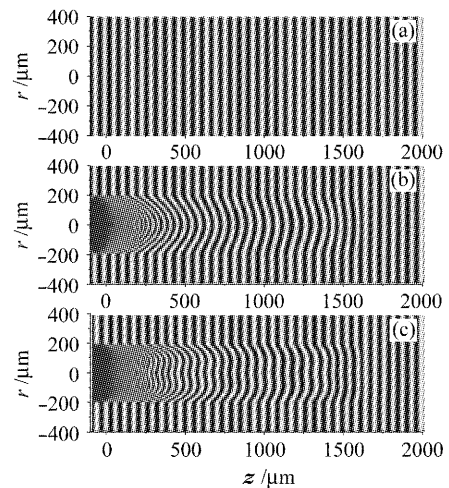


图 5 不同电子密度分布时的干涉条纹

Fig. 5 Interferogram of different density distribution

由于等离子体折射,探针激光中穿越等离子体

部分(物光)相对于未经过等离子体部分(参考光)会附加一定的光程差,干涉条纹就会发生移动(弯曲)。图 5 是一组采用上述设计的 Normaski 型偏振干涉仪并通过模拟计算得到的干涉条纹图。图 5(a)为没有等离子体时产生的等间距分布的直条纹;(b)为针对图 3 及图 4 中曲线 a 所示的预等离子体电子密度分布下的干涉图;(c)为短脉冲激光产生通道,使等离子体电子密度在通道内重新分布(如图 4 中曲线 b 所示)后的干涉图,该图显示了当形成通道时,通道内的电子密度明显下降,对应于干涉图中通道内的干涉条纹就会发生反向弯曲。

5 结 论

针对二路激光器的实际情况,分析了用它进行快点火所关注的激光等离子体通道实验的可能性,提出了在二路激光器进行实验的排布设计,最后理论模拟了产生通道时的干涉图。

参 考 文 献

- 1 J. Fuchs, G. Malka, J. C. Adam *et al.*. Dynamics of subpicosecond relativistic laser pulse self-channeling in an underdense preformed plasma [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80** (8):1658~1661
- 2 M. Borghesi, A. J. MacKinnon, L. Barringer *et al.*. Relativistic channeling of a picosecond laser pulse in a near-critical preformed plasma [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(5): 879~882
- 3 Claire Ellen Max. Strong self-focusing due to the pondermotive force in plasmas [J]. *Phys. Fluids*, 1976, **19**(1):74~77
- 4 P. E. Young, P. R. Bolton. Propagation of subpicosecond laser pulses through a fully ionized plasma [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(22):4556~4559
- 5 K. Krushelnick, A. Ting, C. I. Moore *et al.*. Plasma channel formation and guiding during high intensity short pulse laser plasma experiments [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(21): 4047~4050
- 6 Hu Xueyuan, Zhong Fangchuan, Deng Jian *et al.*. Ultra-short intense laser pulse profagating in atmosphere. Behavior of self-focusing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6):641~646
胡雪原,钟方川,邓建等.超短强激光脉冲在大气传播中的自聚焦行为[J].*光学学报*, 2001, **21**(6):641~646
- 7 W. L. Kruer. *Physics of Laser Plasma Interactions* [M]. New York: Addison-Wesley, 1988
- 8 Peng Huimin, Wang Shiji. *X-Ray Laser* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 11
彭惠民,王世绩. *X射线激光* [M]. 北京:国防工业出版社, 1997. 11
- 9 Zhang Huihuang, Lin Zunqi, Gu Zhongmin *et al.*. 2660 Å UV laser-plasma probe and interferometric system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1989, **1**(2):169~174
章辉煌,林尊琪,谷忠民等.激光等离子体 2660 Å 紫外探针及干涉系统[J].*强激光与粒子束*, 1989, **1**(2):169~174
- 10 F. C. Jahoda, G. A. Sawyer. *Methods of Experimental Physics* [M]. 9B, Marton L Eds., New York: Academic Press, 1974