

侧照明实验用平面调制微靶的制备及参数测量*

叶君建^{1,2}, 周 斌¹, 徐 翔¹, 何钜华², 沈 军¹, 傅思祖²

(1. 同济大学 波耳固体物理研究所, 上海 200092; 2. 中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘 要: 介绍了用于侧照明实验研究瑞利-泰勒流体学不稳定性(Rayleigh-Taylor instability)实验的聚苯乙烯和铝平面调制微靶的制备工艺。通过图形转移,靶型切割和装配工艺的控制,结合靶参数测量,获得了厚度在几十 μm 、表面具有波长 50 μm 和 55 μm 、振幅从几到几十 μm 、微靶宽度约为 200 μm 、剖面正弦调制图形清晰的两种靶型。

关键词: 瑞利-泰勒(R-T)流体学不稳定性; 聚苯乙烯; 铝; 平面调制靶

中图分类号: TL639 **文献标识码:** A

瑞利-泰勒流体学不稳定性实验是惯性约束聚变实验(inertial confinement fusion, ICF)的重要组成部分,是影响 ICF 实验成败的重要原因。靶表面初始扰动或激光不均匀性引起的扰动在烧蚀面得到非线性放大,可能引起烧蚀壳的破裂,或扰动由烧蚀面耦合到内表面,对点火和燃烧产生严重危害。国内外都对 R-T 流体学不稳定性开展了各项研究^[1-4]。为了研究靶表面粗糙度对 R-T 流体学不稳定性影响,在实验用靶表面人为引入调制图形。通过实验打靶,分析调制图形在激光烧蚀过程中扰动放大的情况,获得相关信息。

在国外采用平面调制靶分解的实验很多,也取得了比较多的结果,但是关于平面调制靶的制备以及相关的参数测量却很少系统地介绍。LANL 实验室使用金刚石车削与电火花加工(EDM)技术在铜箔表面加工出调制图形^[5]。国内同济大学在制备平面调制靶方面开展了很多相关的研究^[6-7]。

本文介绍了用于 2005 年侧照明实验研究 R-T 不稳定性实验采用的聚苯乙烯和 Al 调制微靶的制备及靶参数测量。在靶制备中,研究调制图形精确转移过程控制、靶的微切割和微装配工艺的控制,实现侧照明实验用调制微靶的制备。

1 侧照明平面调制微靶的制备工艺

1.1 聚苯乙烯平面调制靶制备工艺^[7]

在光学玻璃片上涂上抗蚀剂;采用激光双光束干涉法获得波长在几十 μm 、振幅在几 μm 的 2 维调制图形;用电镀的方法将光学玻璃片上的图形转移到镍(Ni)模板上;以 Ni 图形模板为基板,通过旋涂的方法在 Ni 模板上镀制脱膜层和聚苯乙烯薄膜,控制 C_8H_8 膜厚及图形转移精度;将薄膜靶从 Ni 基板上脱下后,通过微切割结合微装配工艺获得宽度约为 200 μm 的聚苯乙烯平面调制靶。

1.2 Al 平面调制靶制备工艺^[8]

将厚度为 30 μm 、纯度为 99% 的铝箔粘帖到清洗干净的基片上;在铝箔上旋涂光刻胶,将掩模板和铝箔表面掩模接触套准图形曝光,再将铝箔浸入显影液中进行显影,形成表面周期为 50 μm 的图形;将铝箔放入磷酸腐蚀液中腐蚀,将未保护的 Al 腐蚀掉,获得 Al 的调制图形;在丙酮中洗去光刻胶,然后揭下铝箔;通过微切割和微装配工艺的方法制备宽度约为 200 μm 的 Al 平面调制微靶。

2 平面调制靶的测量

根据侧向照明实验打靶的要求,将制备的平面调制靶粘帖到靶架上做成自支撑靶型(见图 1)。在平面调制靶制备的过程中,运用 α -step500 表面轮廓仪和测量显微镜对靶表面调制的周期、调制高度、靶的厚度等几个参数进行测量(见图 2)。

* 收稿日期:2005-12-27; 修订日期:2006-05-26

基金项目:国家 863 计划项目资助课题,同济大学理科发展基金资助课题(1370219047)

作者简介:叶君建(1979—),男,在职硕士,主要从事 ICF 实验用靶的微加工制备;0520103045@mail.tongji.edu.cn。

联系作者:周 斌(1970—),男,博士,教授,博士生导师,zhoubin863@mail.tongji.edu.cn。

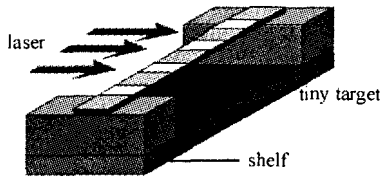


Fig. 1 Self-supporting foil perturbation target

图 1 自支撑平面调制靶结构图

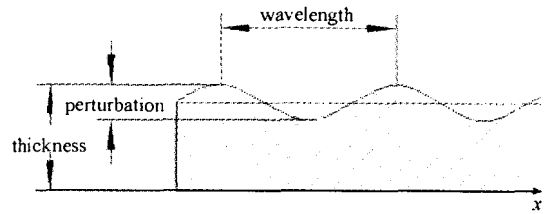
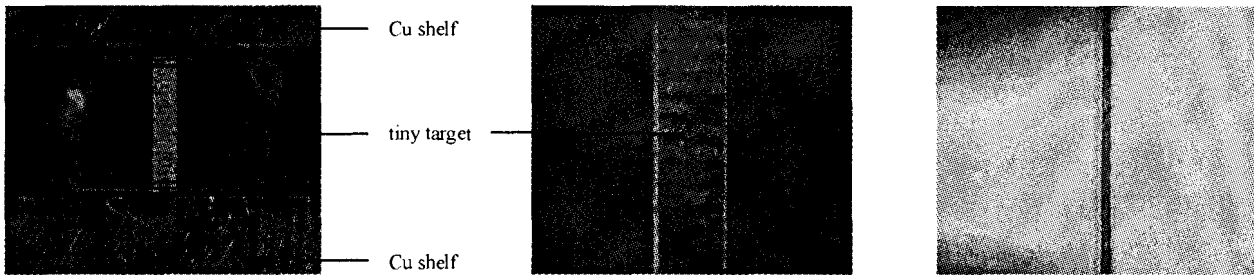


Fig. 2 Parameters of surface figure on foil perturbation target

图 2 平面调制靶表面图形参数

2.1 聚苯乙烯平面调制微靶的测量

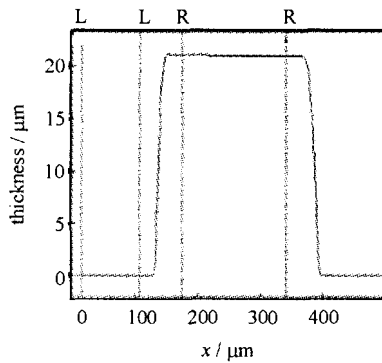
图 3 是 2005 年用于“神光 II”上的侧照明实验的聚苯乙烯平面调制微靶,编号为 05-07-25-03F。调制图形波长为 55 μm,振幅为 2.3 μm,靶宽度为 197 μm,聚苯乙烯厚度为 22 μm。



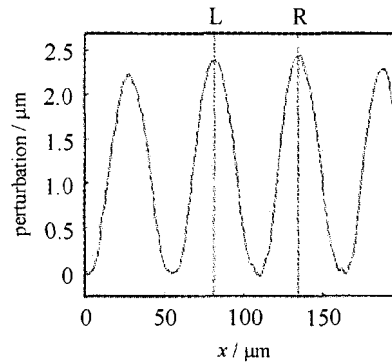
(a) planform of target after assembly

(b) planform of the target after incision(width: 197 μm)

(c) sectionnal view of tiny target



(d) thickness of polystyrene target



(e) surface perturbation on target (wavelength: 55 μm, perturbation: 2.3 μm)

Fig. 3 Figures and parameters of polystyrene surface perturbation tiny targets in flank illumination experiment

图 3 侧照明用聚苯乙烯平面调制靶形貌及参数

2.2 Al 平面调制微靶的测量

图 4 是 2005 年用于侧照明实验用 Al 平面调制靶,编号为 05-08-02-T-Al-01A。调制图形波长为 50 μm,振幅为 13 μm,靶宽度为 189 μm,Al 膜厚度为 30 μm。

3 讨 论

3.1 图形转移精确控制

聚苯乙烯平面调制微靶和 Al 平面调制微靶是通过两种工艺获得的,所以各自有不同工艺特点。聚苯乙烯平面调制靶使用 Ni 图形模板,在匀胶机上将溶解的聚苯乙烯溶液旋涂到 Ni 模板上经脱膜获得。Ni 模板的表面质量决定了调制靶的调制高度、周期以及靶表面的粗糙度。电镀 Ni 模板表面的图形精确转移是制靶的关键步骤^[7]。通过旋涂速率和聚苯乙烯溶液浓度的控制实现膜厚的精确控制。Ni 图形模板表面的清洁和脱膜层镀制,有利于有机膜的脱膜和图形精确转移。

Al 平面调制靶是在铝箔表面的光刻胶上获得掩模图形,再通过浓磷酸溶液(少量乙醇)腐蚀的方法获得调制图形。其优点是腐蚀液成分比较单一,腐蚀方法简单和易于控制,反应式为 $2Al + 6H_3PO_4 = 2Al(H_2PO_4)_3 + 3H_2 \uparrow$,产生的 $Al(H_2PO_4)_3$ 溶于腐蚀液,从而实现图形的获得。腐蚀液腐蚀速度随着磷酸浓度的增加而增加,为了降低样品在腐蚀液中浸泡时间过长导致光刻胶脱落现象而影响图形完整性,选择质量分数为 85% 的浓磷酸。腐蚀过程中腐蚀液对 Al 的腐蚀是各向同性的,会产生钻蚀现象。根据实验,发现在 80 °C 条件下腐蚀

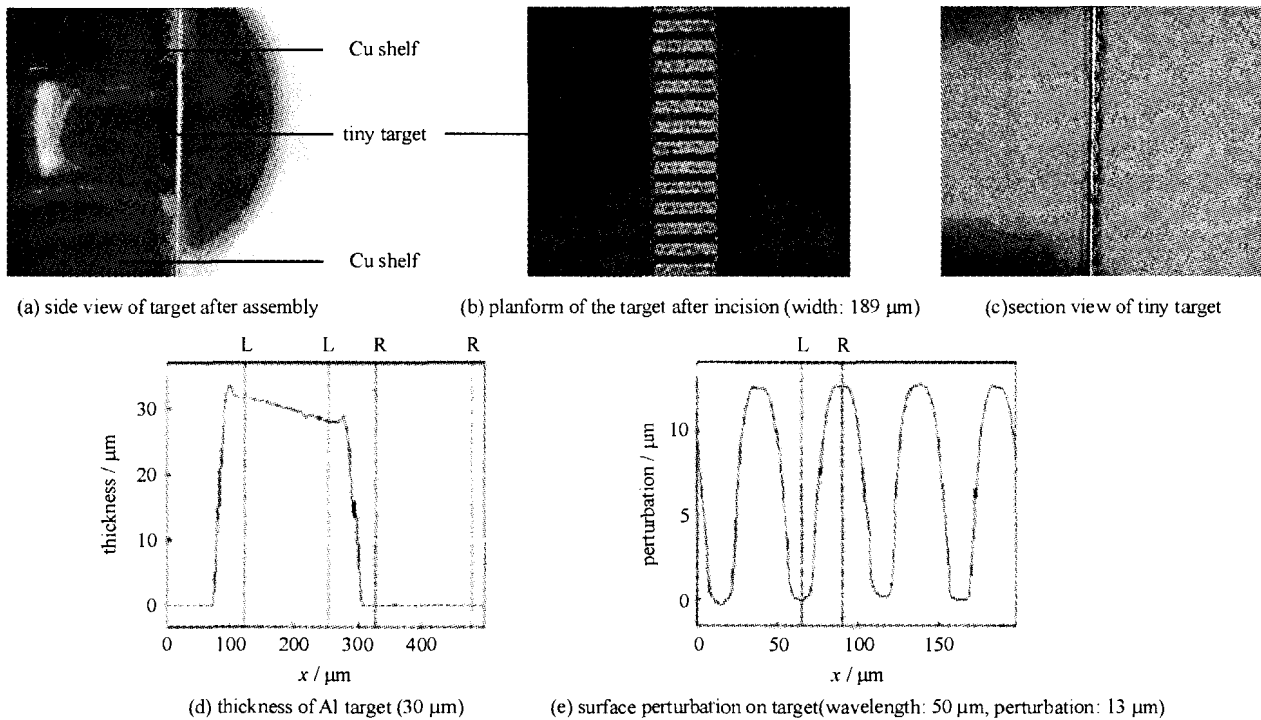


Fig. 4 Figures and parameters of Al surface perturbation tiny targets in flank illumination experiment

图 4 侧照明用 Al 平面调制靶形貌及参数

2~3 min 时,调制图形可保持完整形貌和较深的深度。

3.2 微切割、微装配工艺

实验采用的侧照明方式,诊断光侧向经过平面调制靶而形成阴影,直接测量出靶的调制及靶厚度随时间的变化。为了得到成型的自支撑平面调制靶(见图 3 和图 4),将制备的平面调制靶微切割成约为 200 μm 的窄条,并将窄条装配到靶架上。

将平面调制靶展平到很平整的玻璃上,用一块边上没有倒角的石英玻璃片压在平面调制靶上面,在测量显微镜观测下,将靶一边移出石英片 200 μm 。用很锋利的双面刀片沿着石英的边均匀用力地在靶上划过,形成一条一定宽度的窄条。用酒精湿润的毛笔将窄条轻轻地从玻璃表面转移到另一块玻璃片上,用测量显微镜测量窄条的宽度并观察窄条的外观质量。将窄条粘附到靶架上,因为靶的宽度比较窄,厚度很薄,用很少量的煤油湿润就可吸附在靶架上面。通过显微镜的观察,调节窄条相对靶架到最好的位置,窄条的侧面和正面投影在显微镜下能形成一条直线,最后用 502 胶水小心地将窄条粘在靶架上,以防止微靶从靶架上脱落。

4 结 论

通过上述的制备工艺获得平面调制图形。得到靶的调制高度、周期、靶的厚度以及切割后窄条的宽度等各项参数测量的结果,并在实验打靶的结果来看,两种平面调制微靶符合 R-T 流体力学不稳定实验的要求。相关的打靶实验结果正在分析中。

参考文献:

- [1] Emery M H, Gardner J H, Bodner S E. Strongly inhibited Rayleigh-Taylor growth with 0.25 μm lasers[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **57**(6): 703-706.
- [2] Aref H, Tryggvason G. Model of Rayleigh-Taylor instability[J]. *Phys Rev Lett*, 1989, **62**(7):749-752.
- [3] 吴俊峰,叶文华,张维岩,等. 二维不可压流体瑞利-泰勒不稳定性的非线性阈值公式[J]. *物理学报*, 2003, **52**(07):1688-1693. (Wu J F, Ye W H, Zhang W Y, et al. Nonlinear threshold of two-dimensional Rayleigh-Taylor growth for incompressible liquid. *Acta Phys Sin*, 2003, **52**(07):1688-1693)
- [4] 董佳钦,周关林,叶君建,等. 激光直接驱动 R-T 不稳定性的侧向照明诊断实验探索[C]//第七届激光科学技术青年学术交流会论文集. 2003:363-366. (Dong J Q, Zhou G L, Ye J J, et al. The flank illumination R-T instability experiment is researched by the direct-drive laser. Proc of the 7th Laser Science and Technology Symposium for youngth. 2003: 363-366)
- [5] Schappert G T, Batha S H, Klare K A, et al. Rayleigh-Taylor spike evaporation[J]. *Phys of Plasmas*, 2001, **8**(9):4156-4162.

- [6] 周斌, 孙琪, 黄耀东, 等. ICF 分解实验中的平面调制靶和薄膜靶的研制[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(1):79-83. (Zhou B, Sun Q, Huang Y D, et al. Development of surface perturbation target and thin silicon foil target used to research Rayleigh-Taylor instability in Inertial Confinement Fusion experiment. *Atomic Energy Science and Technology*, 2004, 38(1):79-83)
- [7] 周斌, 王珏. ICF 分解实验中的平面调制靶[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(4):636-640. (Zhou B, Wang J. Surface perturbation target for the resolved experiments of inertial-confinement fusion experiments. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, 9(4):636-640)
- [8] 孙琪, 周斌, 杨帆, 等. 深振幅 Al 调制靶的化学腐蚀制备工艺研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(9):1382-1386. (Sun Q, Zhou B Yang F, et al. Aluminium target with deep amplitude modulation fabricated by chemical wet etching process. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(9):1382-1386)

Fabrication and measurement of surface perturbation tiny targets in flank illumination experiment

YE Jun-jian^{1,2}, ZHOU Bin¹, XU Xiang¹, HE Ju-hua², SHEN Jun¹, FU Si-zu²
(1. *Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China*;
2. *Shanghai Institute of Laser and Plasma, CAEP, Shanghai 201800, China*)

Abstract: This paper introduces fabrication of polystyrene and aluminum surface perturbation targets used for flank illumination Rayleigh-Taylor instability experiment. By figure transfer, incising targets, controlling constructional technique and measuring targets' parameters, we obtained surface perturbation targets with sinusoidal surface perturbation figures with thickness of several tens micrometer, the wavelength about 50 micrometer and amplitude from several to several tens micrometer. The width of two kinds of eargets is about 200 micrometer and the profile is clear.

Key words: Rayleigh-Taylor instability; Polystyrene; Aluminum; Surface perturbation target