

研究瑞利-泰勒流体力学不稳定性的 实验用靶*

周 斌 王 珏 沈 军 张玉龙⁺ 陈玲燕

(同济大学波耳固体物理研究所,⁺化学系 上海 200092)

提要 介绍了以激光干涉法形成正弦调制起伏图形,结合电镀图形转移工艺获得了图形模板,采用旋转涂覆等工艺将调制图形转移至掺溴聚苯乙烯薄膜的表面,获得了掺溴聚苯乙烯平面调制箔靶。研究了调制起伏图形的精确转移工艺,以 SEM 和台阶仪监控图形转移过程,控制耦合在调制图形上的表面粗糙度。

关键词 瑞利-泰勒流体力学不稳定性,平面调制靶,掺溴聚苯乙烯,ICF 制靶技术

1 引 言

在直接驱动惯性约束聚变(ICF)研究中,由于靶丸表面不均匀性引起的瑞利-泰勒流体力学不稳定性是 ICF 实验中迫切需要克服的一个关键问题^[1~4]。研究证明,通过在有机膜上人为引入面密度扰动可模拟靶丸表面的不完整性,采用 X 射线背景照明技术诊断,可获得不稳定性增长的信息,为此国内外许多研究小组开展具有表面起伏图形的平面调制靶的研制,用于 ICF 分解实验研究瑞利-泰勒流体力学不稳定性。

本文针对国内外 ICF 实验进展,在跟踪国际上 ICF 分解实验的基础上将现代微加工技术和现代测试手段相结合,为平面调制靶的制备奠定基础。实验中采用激光干涉法结合电镀 Ni 工艺获得具有表面起伏图形的 Ni 模板,以旋转涂覆、流延工艺和热压工艺将图形转移至掺溴聚苯乙烯薄膜表面,经脱膜获得掺溴聚苯乙烯平面调制箔靶。研究不同工艺对图形精确转移的影响,采用扫描电子显微镜(SEM),台阶仪等手段监控图形的转移过程,控制耦合在表面调制图形上的表面粗糙度。

2 实验技术路线

理论证明,长波、中波和短波扰动分别对靶丸压缩、壳裂和混合过程产生影响。采用不同波长和振幅的平面调制靶可从实验上研究不同幅度的表面起伏对靶物理过程的影响。

掺杂平面调制靶的制备由以下部分组成:以激光干涉法在光刻胶表面形成不同波长和振幅的正弦调制图形;通过电镀 Ni 图形转移工艺将耦合在光刻胶上的调制图形转移至金属 Ni

* 863 计划(863-416-3-9)及中国工程物理研究院院外基金资助项目。

收稿日期: 1998-03-05; 收到修改稿日期: 1998-06-23

表面,获得 Ni 基图形模板;采用旋转涂覆、流延工艺和热压工艺将正弦调制图形转移至掺溴聚苯乙烯薄膜表面;脱膜获得掺溴聚苯乙烯平面调制箔靶。

3 制备工艺研究及控制

3.1 激光干涉法获得表面调制图形

采用双光束激光干涉^[5,6],其光强分布为 $I = 2I_0(1 + \cos\delta)$, δ 为相干光到达观察屏时所产生的振幅的相差。当光强分布转化为空间几何分布时,在光刻胶表面得到理想的正弦调制图形。

3.2 图形的电镀转移

将光刻胶表面的正弦起伏图形转移到金属基衬底上,是平面调制靶制备的一个重要环节。采用电镀工艺实现图形的转移;在光刻胶图形表面蒸镀一层导电 Ag 膜作为电镀阴极,控制阴极电流密度和电镀时间,在 Ag 膜表面电镀 Ni 层,脱下 Ni 层,获得一次转移 Ni 模板;对一次转移模板的表面钝化处理,再次电镀获得二次转移 Ni 模板,采用一次转移模板可多次电镀获得二次转移模板,用二次转移模板作为掺溴聚苯乙烯表面图形的转移模板。

比较不同电镀液对电镀 Ni 层结构的影响,选用氨基磺酸镍 $(\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ 为镀液,可获得内应力接近于零的镀层^[7]。Ni 阳极采用 99.9% 的含硫镍球,控制电镀液的 pH 值、电镀温度、阴极电流密度得到均匀性、致密性好的电镀 Ni 层。在本实验的电镀 Ni 过程中,电镀液温度为 40~42℃,pH 值维持在 3.8~4.0,采用的阴极电流密度为几十 mA/cm^2 ,电镀前对光刻胶表面图形的清洁处理是获得良好图形转移的保证。

3.3 有机膜上的调制图形转移

瑞利-泰勒不稳定性研究用靶要求选用低 Z 的膜材料,以物化性能较稳定的聚苯乙烯作为膜材料。在聚苯乙烯材料上掺入少量的 Br 原子,可在实验诊断时提供特殊的信息。采用二次转移 Ni 模板,以掺溴聚苯乙烯-氯仿溶液为源,研究旋转涂覆、流延工艺和热压工艺对图形转移的影响。

聚苯乙烯薄膜的热塑性较好,采用热压工艺将图形复制到薄膜表面。使用小型油压机(0~40 MPa),配备加热装置。在旋转涂覆法制备的掺溴聚苯乙烯薄膜上通过控制热压的压力和温度来获得转移图形;采用流延工艺在 Ni 模板表面直接形成聚苯乙烯薄膜。将掺溴聚苯乙烯-氯仿溶液均匀流过 Ni 模板表面,待氯仿溶剂挥发后,刮下薄膜,得到具有起伏图形的聚苯乙烯薄膜;另外还研究以旋转涂覆在二次转移图形模板上直接制备掺溴聚苯乙烯薄膜,待氯仿被挥发后,脱膜获得具有表面起伏图形的掺溴聚苯乙烯薄膜。

3.4 图形转移精度的监控

采用扫描电子显微镜和台阶仪观察图形转移每个过程中图形的形貌,监控整个工艺过程。测量用扫描电子显微镜为 Leica-Cambridge S360 型。采用 Tencor 公司的精度为纳米级的 α -step 500 型台阶仪测量耦合在调制图形上的表面粗糙度。

4 结果与讨论

4.1 图形转移形貌测量

图形转移精确与否是平面调制靶制备的关键,以扫描电子显微镜和台阶仪观测每次图形

转移后获得图形的形貌,确保调制图形获得精确转移。

电镀 Ni 图形转移工艺是掺溴聚苯乙烯平面调制箔靶制备中图形转移的第一步。运用扫描电子显微镜对光刻胶上的图形、经一次转移形成在 Ni 层上的图形和二次转移获得的 Ni 模板上的图形进行测量,以确定表面调制图形转移的精确性。从图 1 可见,经过两次电镀转移后,表面起伏图形接近理想的正弦状,其中图 1 (b) 和图 1 (c) 是一次转移 Ni 模板和二次转移 Ni 模板剖面的 SEM 图形。

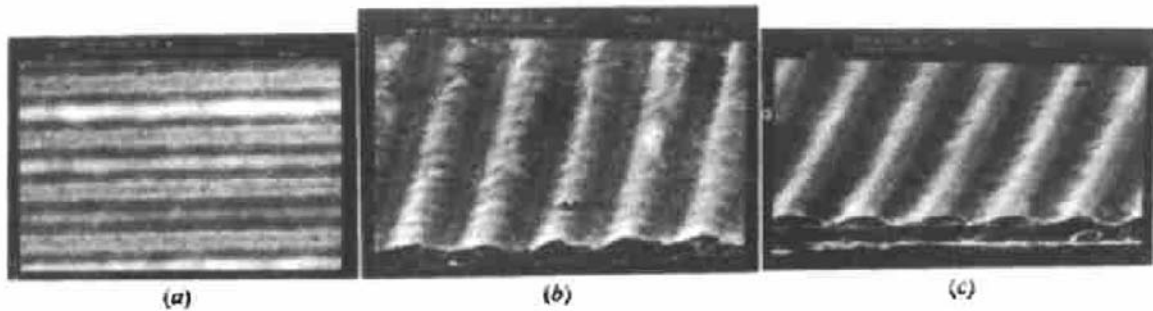


图 1 复制图形的 SEM 测量

(a) 光刻胶表面图形(400×), (b) 一次转移 Ni 模板图形(450×, 样品台偏转 60°),
(c) 二次转移 Ni 模板图形(450×, 样品台偏转 60°)

Fig. 1 SEM of transferred figures

(a) figure on the photoresist (400×); (b) cross section of the Ni plate (450×); (c) cross section of the Ni plate (450×)

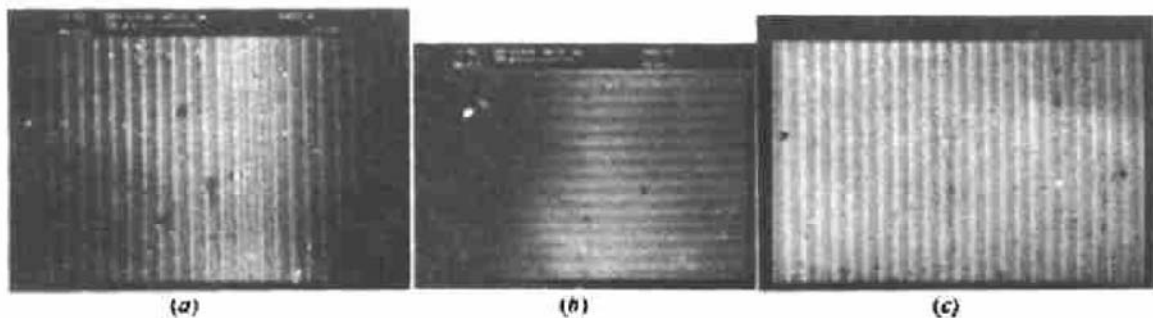


图 2 扫描电镜测量薄膜表面图形形貌(100×)

(a) 流延薄膜表面图形, (b) 热压薄膜表面图形, (c) 旋转涂覆薄膜表面图形

Fig. 2 Figures on films measured by SEM (100×)

(a) prepared by a doctor-blade casting process; (b) prepared by a thermal press process; (c) prepared by spin-coating

将图形转移到掺溴聚苯乙烯薄膜的表面是图形转移技术的第二个关键。扫描电子显微镜测量表明,热压、流延和旋涂工艺都能将 Ni 模板上的图形转移至薄膜表面,采用流延工艺获得的掺溴聚苯乙烯薄膜,利用溶液自然流过 Ni 模板的表面形成薄膜,形成的掺溴聚苯乙烯薄膜的厚度均匀性较差,有时薄膜表面还会有褶皱;采用热压工艺获得的具有图形的掺溴聚苯乙烯薄膜的正反面都有调制图形,不符合 ICF 分解实验用靶的要求;旋转涂覆工艺直接在 Ni 模板表面形成薄膜,是获得具有精确转移图形的掺溴聚苯乙烯薄膜的有效途径,由此制得的薄膜厚度均匀性好,表面图形形貌完整,图形可精确转移。图 2 为采用三种图形转移工艺获得的掺溴聚苯乙烯薄膜表面的调制起伏图形的扫描电镜照片。

4.2 表面粗糙度测量

实验中在形成表面图形的同时,还需要严格控制耦合在箔靶图形表面的粗糙度。图 3 为

掺溴聚苯乙烯平面调制箔靶表面粗糙度测量结果。由于调制靶由表面起伏构成,必须测量耦合在调制图形上的表面粗糙度,为此选择调制图形中某个正弦图形的波谷到波峰间的一段为测量段,其范围为 $5\ \mu\text{m}$ (波长方向)。测量显示,Ni 模板图形表面粗糙度为 $15.0\ \text{nm}$,旋转涂覆获得的掺溴聚苯乙烯薄膜表面粗糙度为 $14.2\ \text{nm}$,流延工艺获得的掺溴聚苯乙烯薄膜表面粗糙度为 $9.8\ \text{nm}$ 。

4.3 掺溴含量的测量及控制

采用 Waters 150C 型凝胶色谱仪对自制的掺溴聚苯乙烯材料进行测量,其相对分子量 MW 约为 7 万到 10 万,相对分子量分布 $d < 2$,离子色谱测量表明材料的掺溴原子百分含量最高可达 12.8%,掺溴量可通过改变加入溴代反应中的 Br 含量来调节。

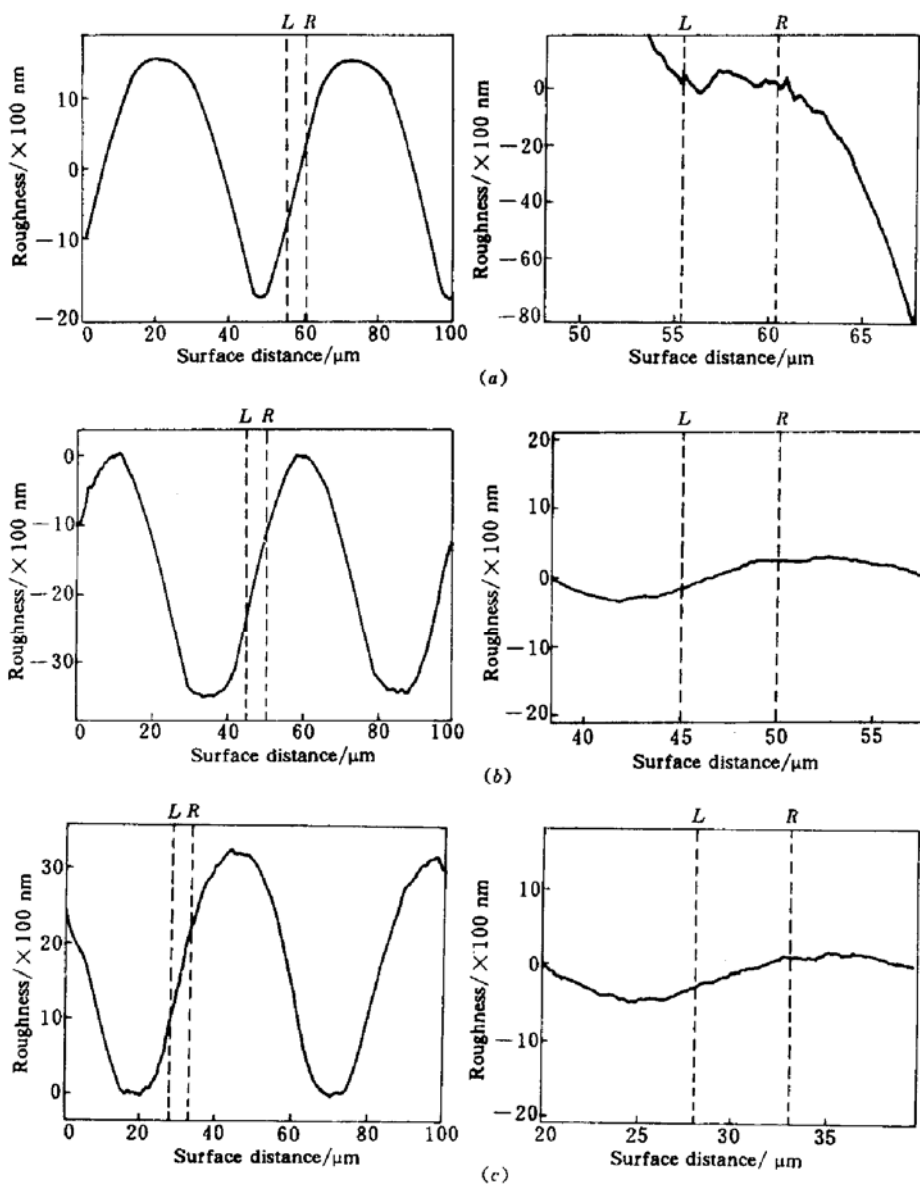


图 3 平面调制靶的表面粗糙度

(a) Ni 模板表面粗糙度; (b) 旋涂法制备的箔靶表面粗糙度; (c) 流延工艺制备的箔靶表面粗糙度

Fig. 3 Surface roughness on a surface perturbation target of brominated polystyrene

(a) surface roughness on a Ni plate; (b) surface roughness on the film prepared by spin-coating;

(c) surface roughness on the film prepared by a doctor-blade casting process

5 结 论

将激光干涉法结合电镀图形转移获得具有调制起伏图形的 Ni 基模板,采用旋转涂覆工艺成功地将图形转移至聚苯乙烯薄膜的表面。对图形转移工艺的研究表明,经过整个工艺流程后,图形形貌未遭到破坏,仍具有较好的正弦状起伏图形。采用此工艺流程,目前我们已获得波长为 20~100 μm ,振幅在 0.2~3.5 μm 的系列正弦调制图形模板,对所得的平面调制靶的参数测量表明,该工艺流程能基本满足 ICF 分解实验用靶要求,为用于 ICF 分解实验中的平面调制靶的制备奠定了良好的基础。

参 考 文 献

- 1 M. H. Emery, J. H. Gardner, S. E. Bodner. Strongly inhibited Rayleigh-Taylor growth with 0.25- μm lasers. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 57(6):703~706
- 2 H. Aref, G. Tryggvason. Model of Rayleigh-Taylor instability. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, 62(7):749~752
- 3 K. O. Mikaelian. Explicit growth rates for the Rayleigh-Taylor instability in exponential density profiles. *Phys. Rev. A*, 1989, 40(8):4801~4803
- 4 K. O. Mikaelian. Lasnex simulations of the classical and laser-driven Rayleigh-Taylor instability. *Phys. Rev. A*, 1990, 42(8):4944~4951
- 5 Chen Jianrong, Wang Jue, Chen Lingyan *et al.*. Preparation of surface perturbation target for inertial-confinement fusion experiment. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1996, 8(4):616~621 (in Chinese)
- 6 Zhou Bin, Wang Jue, Shen Jun *et al.*. Surface perturbation target for the resolved experiments of inertial-confinement fusion experiments. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1997, 9(4):636~640 (in Chinese)
- 7 Q. X. Tan, H. T. Guo, S. L. Liu *et al.*. Principle and Technology of Electroplate. Tianjin; Tianjin Press of Science and Technology, 1993. 152

Surface Perturbation Target for the Study of Rayleigh-Taylor Instability

Zhou Bin Wang Jue Shen Jun Zhang Yulong⁺ Chen Linyan

(Pohl Institute of Solid State Physics, ⁺Department of Chemistry,
Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract The preparation process of a surface perturbation target on a brominated polystyrene foil was introduced in this paper. Through a laser interference process and Nickel-electroplate figure-transfer process, a Ni-plate with sine modulated perturbation figure was obtained. Taking further steps to transfer the sine perturbation figure on the brominated polystyrene foil by spin-coating, doctor-blade casting and the thermal press process were studied. The transfer-precision of sine perturbation figures on the brominated polystyrene foil was measured by SEM and an α -step apparatus. The Bromine content in the brominated polystyrene was controlled. The surface roughness on the surface perturbation target of the brominated polystyrene foil was analysed.

Key words Rayleigh-Taylor instability, surface perturbation target, brominated polystyrene, ICF target fabrication technology