

文章编号:1004-4213(2010)06-1085-4

# 基于紫外纳米压印的菲涅耳透镜制作\*

邹建兵, 浦东林, 申溯, 陈林森

(苏州大学 信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要:**针对传统聚光系统中菲涅耳透镜成本较高并且光强分布不均匀的弊端,提出了利用紫外纳米压印技术制作菲涅耳透镜的方法.利用几何光学的光线追迹理论,设计了菲涅耳透镜模具.采用自行研制的紫外纳米压印系统对模具进行压印,紫外曝光后制得薄膜菲涅耳透镜.在太阳光下进行了测试,测试结果表明,低成本、高聚光倍数和光强分布均匀的菲涅耳透镜是可以实现的.

**关键词:**菲涅耳透镜;紫外纳米压印;聚光型太阳能系统

**中图分类号:**TN205; TN303

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103906.1085

## 0 引言

聚光型太阳能系统<sup>[1]</sup> (Concentrator Photovoltaic systems, CPVs)作为近年来太阳能光伏发电的新技术热点,为未来解决能源问题提供了广阔的前景. CPVs通过菲涅耳透镜(Fresnel Lens, FL)等聚光元件<sup>[2-4]</sup>把一定面积上的光会聚在一个狭小的区域(焦斑),太阳能电池仅需焦斑面积的大小即可,从而大幅减少了太阳能电池的用量. FL作为聚光元件,可以进一步降低发电成本和提高效率.然而焦斑温度越高,将导致太阳能电池的转换效率下降,同时要求的垂直照射准确度越高,基于这两方面技术上的限制,目前 FL能达到的聚光倍数仅限于1000.随着行业对技术应用的提升,对低成本、高聚光倍数和光强分布均匀的超薄 FL的制作研究备受关注.

纵观 FL的制作方法,代表性的主要包括电子束直写、反应离子束刻蚀和薄膜沉积法等.普遍存在的问题是工艺过程复杂,制作成本高,存在制作误差,性价比低,不易生产和维护等.

针对上述问题,本文采用紫外纳米压印(Ultraviolet Nanoimprint Lithography, UV-NIL)技术<sup>[5-6]</sup>制作用于 CPVs的薄膜(以 PC为基底)FL,特点是制作成本低,聚光倍数高和光强分布均匀,并且易于封装与维护.基本思想是首先运用几何光学的光线追迹理论进行 FL模具的设计,其次利用自行研制的紫外纳米压印系统对模具进行压印,紫外曝光后即可制得 PC基底 FL.将 PC基底 FL在太阳光下进行了测试分析,给出了详细的测试结果.

## 1 FL 的设计

FL的设计思想是将透镜分解成若干个具有不同曲率半径的环带,每一个环带的焦距不同,但通过每一个环带的光线会近似的汇聚在同一像点上.因此,消球差是 FL固有的特点.但由于用做 FL的材料对不同的波长具有不同的折射率,因此,太阳光束经过 FL后形成的光斑尺寸会随波长的不同而变化,从而产生色差<sup>[7]</sup>.

图1为 FL的简化示意图,各个环带的齿形主要取决于面形角 $\alpha_i$ (下标*i*表示 FL的环带数,如无特殊说明,均为*i*≥1).设 FL材料的折射率为*n*,如 PC(Polycarbonate)在常规波长下的折射率为1.592. FL的焦距为*f*,第0级锯齿的宽度为 $d_0/2$ ,

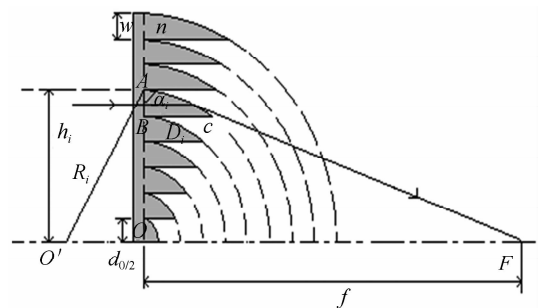


图1 FL的简化示意

Fig. 1 Schematic diagram of FL

第*i*级锯齿的宽度均为*w*.第*i*级锯齿的根部到透镜中心的距离为 $h_i$ ,锯齿的深度为 $D_i$ ,第*i*个环带的曲率半径为 $R_i$ .利用几何光学的光线追迹理论可推导出 $\alpha_i$ , $D_i$ 和 $R_i$ 的计算公式(类似的推导过程可参考文献[8])为

$$\tan \alpha_i = iw / \{n[(f - w \tan \alpha_i)^2 + (iw)^2]^{1/2} - (f - w \tan \alpha_i)\} \quad (1)$$

$$D_i = w \tan \alpha_i = iw^2 / \{n[(f - w \tan \alpha_i)^2 + (iw)^2]^{1/2} - (f - w \tan \alpha_i)\} \quad (2)$$

\* 国家自然科学基金(60777039)资助

Tel:0512-62588956 Email:wangjiazoujianbin@163.com

收稿日期:2009-09-27

修回日期:2009-11-20

$$R_i = \sqrt{\left(\frac{D_i^2 + w^2}{2D_i}\right)^2 + (iw)^2} \quad (3)$$

因此,当 FL 的材料确定,锯齿的宽度  $w$  确定(实际设计时往往取宽度  $w$  等于第 0 级锯齿的宽度,即  $w=d_0/2$ ),总环数确定以及整个透镜的焦距  $f$  确定,便可以根据式(1)、(2)、(3)计算出对应于每一环带  $i$  的面形角  $\alpha_i$ ,锯齿深度  $D_i$  和曲率半径  $R_i$ ,从而为后续在金刚石车床上加工出 FL 模具奠定了基础。

## 2 UV-NIL 实验

### 2.1 实验设置

利用 UV-NIL 技术制作 FL 须在净化间内进行,以保证不会因环境变化和干扰对 FL 产生污染。图 2 为自行研制的 UV-NIL 系统及工艺流程图,与其他 UV-NIL 设备<sup>[9-12]</sup>相比,这套系统可以避免压印压力不均匀和 UV 曝光不均匀等缺点。整个系统由三部分组成,分别为压印、UV 曝光和脱模部分。实验所使用的 UV 固化胶 2 的运动粘度为 120.69cst,折射率为 1.48,PC 基底 1 的厚度为 0.381 mm。用于曝光的 UV 灯 5 的功率为 125 W,波长为 365 nm。

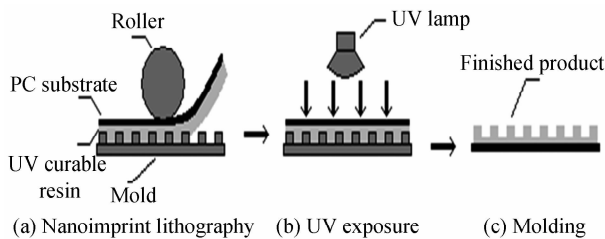


图 2 UV-NIL 系统及工艺流程

Fig. 2 System and techniques flow chart of UV-NIL

压印所需的 FL 模具由金刚石车床加工。如图 3,设计并加工的 FL 模具的口径为 60 mm,整个环数为 1 200 环,锯齿的宽度均为  $50 \mu\text{m}$ ,深度范围为  $0.3 \sim 13 \mu\text{m}$ ,以及根据式(1)、(2)、(3)计算出的焦距为 139.4 mm。

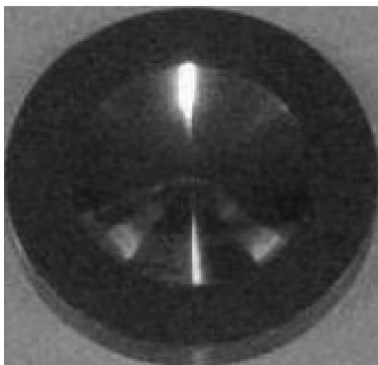


图 3 FL 模具

Fig. 3 Mold of FL

整个 UV-NIL 实验包括如下三个步骤:

1)在 PC 基底上旋涂一层均匀的 UV 固化胶,然后将 PC 基底覆于 FL 模具上并经滚筒辊压,使 UV 固化胶充满 FL 模具的微细凹凸结构,辊筒的速度为 20cm/s;2)在常温常压下进行 UV 曝光,曝光时间为 15s;3)脱模后即可制得 PC 基底 FL。

### 2.2 实验结果与讨论

图 4(a)、(b)、(c)和(d)分别为经 UV-NIL 实验制得的 PC 基底 FL 的实物照片、在共聚焦显微镜(Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM)下的三维结构图、锯齿的深度曲线图和锯齿的深度数据图。图 4(c)中黄色阴影部分是两个锯齿的宽度,为  $99.842 \mu\text{m}$ ,由于测量和操作的误差,可以认为锯齿的宽度为  $50 \mu\text{m}$ ,左边第一根黄色基线所在的锯齿的深度为  $6.346 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出 UV-NIL 技术很好地复制了 FL 锯齿的结构,这主要是因为:1)所使用的 UV 固化胶的运动粘度适当和光学特性优良;2)采用自行研制的 UV-NIL 系统可以很好的避免压印压力不均匀和曝光不均匀的问题;3)整个实

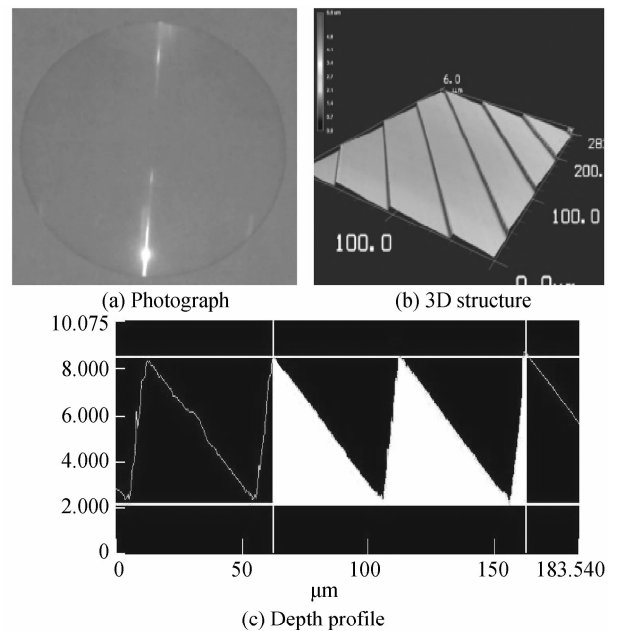


图 4 PC 基底 FL 的实物照片、共焦显微镜下的三维结构图、锯齿的深度曲线图和锯齿的深度数据图

Fig. 4 Photograph, 3D structure in the CLSM, depth profile and depth data of the sawtooth of FL on the PC substrate

验是在常温常压过程中进行的,不会因为温度过高而导致 UV 固化胶的不完全位移。

但是从图 4(c)中可以发现 PC 基底 FL 的锯齿表面略有粗糙,这主要是因为 FL 模具上锯齿表面粗糙,从而造成在脱模过程中有少量的 UV 固化胶残留在模具上.因此,通过选择更为合适的模具材料和对模具表面进行修饰,可以改善锯齿表面的粗糙度。

### 3 FL 的光学特性测试分析

为了分析由 UV-NIL 技术制作的 FL 的光学特性,将 PC 基底 FL 在太阳光下进行了测试。

#### 3.1 FL 的焦距和光斑大小

在太阳光下测得 PC 基底 FL 的焦距为 145 mm,焦点处光斑呈圆形,直径为 4 mm.图 5 是 PC 基底 FL 在阳光下形成的光斑照片.根据 FL 的相关参量,理论计算的 FL 的焦距为 139.4 mm,理论计算的焦距与实际的误差为 4%.UV 固化胶的折射率和 PC 基底的折射率的不匹配及 FL 模具加工准确度的不足,造成了实际制作的 FL 的焦距与理论计算的误差.因此,通过研制与 PC 基底折射率相匹配的 UV 固化胶及提高 FL 模具加工的准确度,可以减小两者之间的误差。

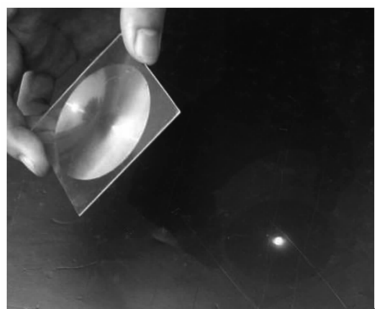


图 5 PC 基底 FL 在阳光下形成的光斑

Fig. 5 Facula of FL on the PC substrate in the sunshine

#### 3.2 FL 的聚光倍数

PC 基底 FL 的有效直径  $D=60$  mm,焦斑的直径  $d=4$  mm,则 FL 的聚光倍数(聚光太阳个数)为

$$C = \frac{\pi \times (D/2)^2}{\pi \times (d/2)^2} = \frac{\pi \times 30^2}{\pi \times 2^2} = 225$$

#### 3.3 光强分布

在直射光强为  $75 \text{ mW/cm}^2$  的太阳光下,测量了 PC 基底 FL 下焦点处光斑光强的径向分布.由图 6 可知,光强的峰值出现在光斑的中心位置,峰值光强为平均光强的 7.24 倍.而文献[13]指出,常规制作的 FL 的峰值光强为平均光强的 12.5 倍.这表明由 UV-NIL 技术制作的薄膜 FL 改善了光强分布的不均匀性。

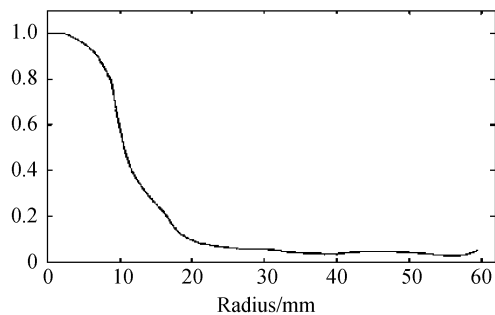


图 6 FL 焦点处光斑光强的径向分布

Fig. 6 Radial distribution of light intensity in the focus of FL

## 4 结论

利用 UV-NIL 技术,实现了低成本、高聚光倍数和光强分布均匀的薄膜 FL 的制作,给出了高质量的制作结果.实验结果表明,UV-NIL 技术可以成为 FL 制作的一种新手段.制作的 PC 基底 FL 的口径为 60 mm,焦距为 145 mm,成像光斑的直径为 4 mm.锯齿的宽度为  $50 \mu\text{m}$ ,深度范围为  $0.3 \sim 13 \mu\text{m}$ .在太阳光下测得 FL 的聚光倍数为 225,同时改善了光强分布的不均匀性。

#### 参考文献

- [1] LUQUE A L, ANDREEV V M. Concentrator photovoltaics [M]. Berlin; The Springer Series in optical Sciences, 2007; 113-175.
- [2] ZHU Rui, LU Zhen-wu, LIU Hua, et al. The solar concentrator design method based on nonimaging optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2251-2255.  
朱瑞,卢振武,刘华,等.基于非成像原理设计的太阳能聚光镜[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2251-2255.
- [3] NING Duo, LIU Fei-hang, WU Yan-rui, et al. Non-tracking transmission solar concentrators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2284-2287.  
宁铎,刘飞航,吴彦锐,等.免跟踪透射式太阳聚光器的设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2284-2287.
- [4] SIERRA C, VAZQUEZ A J. High solar energy concentration with a fresnel lens[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, **40** (2005): 1339-1343.
- [5] SUN Hong-wen, LIU Jing-quan, CHEN Di, et al. Nanoimprint Technology[J]. *Electronics Process Technology*, 2004, **3**(25): 93-98.  
孙洪文,刘景全,陈迪,等.纳米压印技术[J]. *机械工程学报*, 2004, **3**(25): 93-98.
- [6] CHEN Xian-zhong, YAO Han-min, CHEN Xu-nan, et al. The present and future of nanolithography[J]. *Microfabrication Technology*, 2002, **31**(12): 691-695.  
陈献忠,姚汉民,陈旭南,等.纳米光刻技术的现状和未来[J]. *微细加工技术*, 2002, **31**(12): 691-695.
- [7] YEH N. Optical geometry approach for elliptical fresnel lens design and chromatic aberration[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, **93**(8): 1309 - 1317.
- [8] DU Fu-sheng, ZHAO Hai-bin. Fresnel lens design for concentrator[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1982, **3**(2): 167-171.  
杜福生,赵海滨.用于聚光太阳能电池的非涅耳透镜的设计[J]. *太阳能学报*, 1982, **3**(2): 167-171.

- [9] CHAN-PCRK M B, NEO W K. Ultraviolet embossing for Patterning high aspect ratio polymeric microstructures [J]. *Microsystem Technologies*, 2002, **9**(2003): 501-506.
- [10] HUANG P H, HUANG T C, SUN Y T, *et al.* Fabrication of large area resin microlens arrays using gas-assisted ultraviolet embossing [J]. *Opt Express*, 2008, **16**(5): 3041-3048.
- [11] CHANG C Y, YANG S Y, CHU M H. Rapid fabrication of ultraviolet-cured polymer microlens arrays by soft roller stamping process [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, **84**(2007): 355-361.
- [12] LEE J J, PARK S Y, CHOI K B, *et al.* Nano-scale patterning using the roll typed UV-nanoimprint lithography tool [J]. *Microelectronic Engineering*, 2008, **85**(5-6): 861-865.
- [13] JAMES L W. Fresnel optics for solar concentration on photovoltaic cells [J]. *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1978, **13**(6): 673-679.

## Ultraviolet Nanoimprint Lithography for Fabricating Fresnel Lens

ZOU Jian-bing, PU Dong-lin, SHEN Su, CHEN Lin-sen

(*Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China*)

**Abstract:** In view of the drawbacks of Fresnel lens in the traditional condenser optical system, which needs high cost and the light intensity distribution is uneven, a method of fabricating Fresnel lens by ultraviolet nanoimprint lithography is put forward. The mold of Fresnel lens is designed through ray-tracing theory of geometrical optics. The mold is imprinted by the ultraviolet nanoimprint lithography system. And after employing UV light to cure the resin, the ultra-thin Fresnel lens is fabricated. The optical properties of the ultra-thin Fresnel lens on are tested and analyzed in the sunshine. And the results show that the Fresnel lens which has low cost, high concentration and even light intensity distribution can be realized.

**Key words:** Fresnel lens; Ultraviolet nanoimprint lithography; Concentrator photovoltaic systems



**ZOU Jian-bing** was born in 1983. Now he is a graduate student, and his current research interests focus on micro-nano imprinting and fabricating micro-optics devices.



**CHEN Lin-sen** was born in 1961. He is a professor, and his research interests focus on optical information processing, digital photolithographic system, binary optics and holography.