

# 二元位相校正技术在相控列阵 光学系统中的应用\*

杨李茗

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

许 乔

(成都精密光学研究中心, 成都 610041)

**摘 要** 提出一种使用二元光学器件实现位相校正的新方法。在子孔径拼接的相控列阵光学系统中, 采用二元光学器件——二元位相校正板对子孔径拼接后产生的残留波像差进行校正, 既达到位相校正技术要求, 又大大简化系统结构并减小了系统的尺寸和重量。所制作的二元器件具有 8 个台阶, 套刻精度达到  $2\ \mu\text{m}$ , 并使残留波像差降为原来的一半。

**关键词** 二元光学, 相控列阵光学, 测试。

二元光学技术是近 20 年内发展起来的一门新兴光学技术, 它是通过二元掩膜编码和多层台阶去近似相息图或闪耀轮廓以实现高衍射效率, 最终获得高质量光学成像。二元光学制作技术是采用先进的微米级光刻技术和反应离子束刻蚀技术, 在大块基底材料上通过多层掩膜进行套刻和反应离子束蚀刻, 实现精确的、极细微的多台阶相位轮廓结构。目前研究得较普遍的是作为光学聚焦器的微透镜阵列<sup>[1]</sup>, 作为光束分离合成器的达曼(Dammann)光栅<sup>[2]</sup>, 作为新型光学设计方法的混合光学设计<sup>[3]</sup>以及二元计算全息技术<sup>[4]</sup>等。本文将二元光学的设计和制作技术引入相控列阵光学系统, 在多孔径拼接技术的基础上, 采用先进的二元光学元件(BOE), 针对多孔径相控列阵系统中实测的残留波像差进行波差校正。

从 80 年代中期开始, 加工高精度、任意位相分布的二元光学元件成为可能。二元光学技术和传统的折射、反射光学元件组成一种新型的光学系统设计方式。利用先进的加工技术能方便地加工出高精度的任意位相分布, 为光学设计提供更多的自由度和复合功能。它不但可以改进传统的光学系统, 如简化光学系统、减少系统的体积和重量、提高系统的像质, 而且还能实现传统光学设计所不能实现的复合功能的光学系统, 为光学设计和光学加工开拓一片新的领域。

在某些特殊的光学系统中或为达到某些特殊的功能, 需要对系统中的波面进行任意的位相校正, 如本文中研究的相控列阵光学系统, 需要对子孔径相干合成的结果进行位相校正以

\* 国家高技术 863 航天项目资助。

收稿日期: 1997-06-04; 收到修改稿日期: 1997-12-26

使波像差小于  $\lambda/2$ 。可以通过干涉仪测量子孔径拼接的残留误差, 根据测量结果量化得到相应二元光学元件的有关数据。系统中加入二元光学元件校正板, 使拼接误差有明显的改善, 并且这种“折射二元光学元件”并不会给系统引入较大的色差。

相控列阵光学(PAO)是 80 年代后期提出和高新技术<sup>[5]</sup>。相控列阵光学的新构思是来源于综合孔径光学(synthetic aperture optics), 即采用多个尺寸小的子孔径进行相干合成, 合成后的多孔径系统就称为光学相控列阵。图 1 是研制完成的相控列阵光学系统原理图。系统采用折反射型, 即多孔径的主镜和次镜均为反射表面, 二元光学校正板为折射器件, 以适应较宽的波长范围, 成像可以从紫外( $\lambda = 300 \mu\text{m}$ )到远红外( $\lambda < 14 \mu\text{m}$ )。当波长改变后, 只要更换二元器件即可。

相控列阵光学系统的成像质量由数字相位探测技术直接监视和记录, 其灵敏度为  $\lambda/100$ , 相位测定精度  $\lambda/20$ 。图 2 是由 6 块镜面组成的孔径为  $\phi 150 \text{ mm}$  的相控列阵系统的波差图, 其波像差已达到  $1.22\lambda$ 。

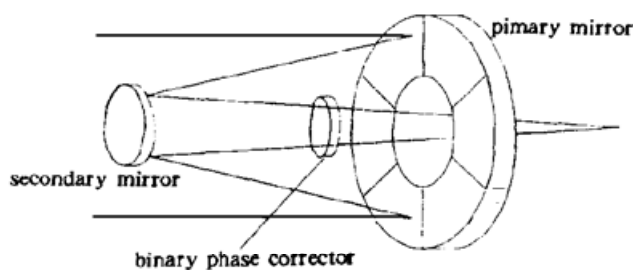


Fig. 1 Structure parameters of PAO system

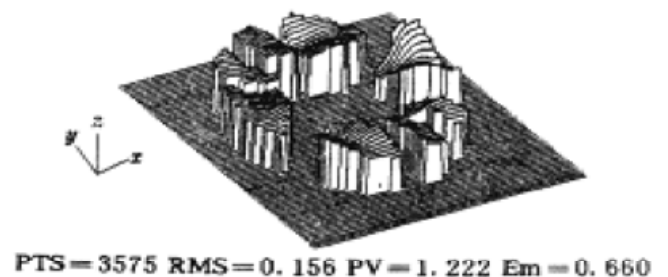


Fig. 2 Original wavefront of PAO system

根据数字相位探测器得到的波差图, 作者设计了 8 台阶二元位相校正模板。即对波差图进行(a):  $\lambda/2$  波差、(b):  $\lambda/4$  波差、(c):  $\lambda/8$  波差切割, 得到三块掩模板数据, 如图 3 所示, 每块掩模板的图形部分为  $100 \times 100$  的栅格, 每个栅格尺寸为  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 。将掩模数据通过电子束曝光方法制得三块铬掩模板。

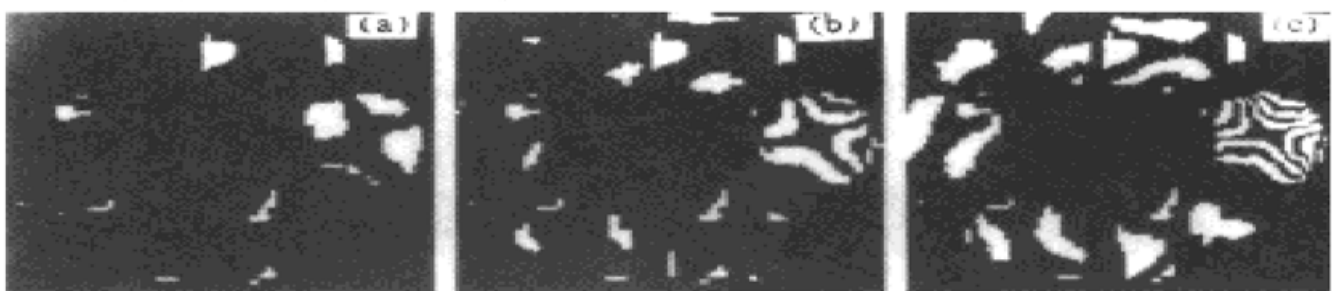


Fig. 3 Binary phase corrector's photographic masks

在获得套刻用的三块掩模板后就可以进行二元位相校正板的制作, 二元位相校正板的制作过程主要包括以下几个步骤:

- 1) 基板的清洗预处理;
- 2) 涂覆光刻胶: 在玻璃基片涂覆  $0.5 \mu\text{m}$  厚的光刻胶层, 光刻胶为 Shipley AZ-1350 光刻胶;
- 3) 光刻。采用接触式曝光机曝光, 曝光波长为  $(300 \sim 436) \text{ nm}$ ;
- 4) 反应离子束刻蚀。实验中使用了 LF-RIBE 型反应离子束刻蚀机, 利用离子轰击物理溅射和化学反应相结合的原理, 对玻璃基片进行反应离子束刻蚀, 蚀刻深宽比达到  $15:1$ ;
- 5) 多层套刻。重复 2) ~ 4) 工艺过程, 进行 3 层套刻, 即可实现 8 台阶的位相校正板制

作。

将制作完成的二元位相校正板插入到相控列阵光学系统的光路中,用数字相控探测系统进行测试,得到加入二元位相校正板后的波差图,如图4所示。从图中可以看出,加位相校正板后子孔径拼接误差有明显的改善。加校正板后剩余波差主要是由于测试时和校正时相控列阵光学子孔径拼接误差的改变造成的。

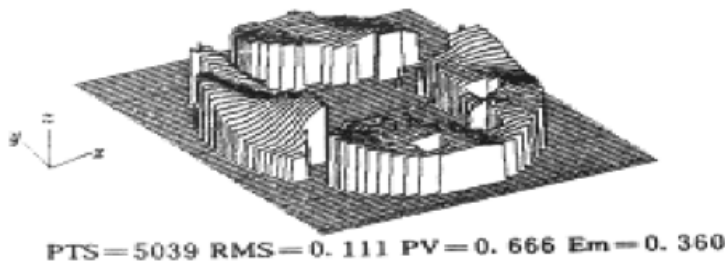


Fig. 4 The wavefront of PAO system (being corrected)

应该指出的是利用二元光学元件校正子孔径拼接误差并不会给系统引入较大的色差。因为实验中未加校正板之前系统的波差基本上在一个波长以内,这样可以用“折射二元光学元件”(即不将位相压缩到 $2\pi$ 内的二元光学元件)校正拼接误差,引入的色差相当于一个光焦度非常小的折射元件的材料色散。

实测结果表明:二元位相校正板已成功地实现了多孔径相控列阵系统中子孔径拼接误差的残留波像差校正,校正后的波差小于0.66波长。由于二元光学器件是用计算机控制的电子束光刻系统来制作的,可以根据多孔径相控列阵系统中实测的残留波像差来设计和加工,波长校正的位置精度可以达到 $\lambda/10$ 以下,确保相控列阵光学可达到超分辨的效果。

### 参 考 文 献

- [1] 许 乔, 阵列光学及微透镜阵列技术研究. 浙江大学博士论文, 1997
- [2] H. Dammann, E. Klotz, Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures. *Opt. Acta*, 1977, **24**(4): 505~ 515
- [3] 叶 钧, 混合光学系统设计理论和CAD实现研究. 浙江大学博士论文, 1997
- [4] Wai-Han Lee, Binary synthetic holograms. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(7): 1677~ 1682
- [5] Janets Fender, Phased array system. *Proc. SPIE*, 1986, **643**: 122~ 128

## Binary Phase Corrector for Phased Array System

Yang Liming

(State Key Laboratory of Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Xu Qiao

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Centre, Chengdu 610041)

(Received 4 June 1997; revised 26 December 1997)

**Abstract** We present a novel method for phase correction by using binary optical elements (BOEs). This method considerably simplifies the structure of the system and decreases its size and weight. This is a typical application of binary optics in modern optical system. In the phased array system, we use binary phase corrector to correct the residual wavefront aberrations. The BOE has eight steps. The experimental result shows that this element decreased the wavefront aberrations to half of the original value.

**Key words** binary optics, phase array optics, measurement.