

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.z1.25

十二分光学掩模星际日冕仪： 数值模拟与制作工艺

华一磊，谢常青

(中国科学院 微电子研究所 微电子器件与集成技术重点实验室，北京 100029)

摘要：分析了相位掩模型日冕仪的工作原理，提出了一种基于十二分光学掩模的星际日冕仪。该日冕仪用一块按照角度分为 12 个扇区的相位掩模来替代李奥结构日冕仪中的振幅型掩模，入射光通过相邻的扇区时会产生 π 的相位差。恒星光经过望远镜聚焦后，产生一个艾里光斑，当光斑的中心与掩模的中心相互重合时，艾里斑被等分为 12 个有着不同相位的子光束，由于光的干涉作用，衍射后被透镜聚焦后处于李奥光阑之外，被李奥光阑阻挡而被大大地减弱。然而行星光的艾里光斑由于偏离掩模的中心，减弱作用远小于处于掩模中心的恒星光，提升了其相对于恒星光的强度，从而更易于被探测到。首先对该型掩模进行了理论分析和数值模拟，分析了其性能；然后使用纳米加工的方法在石英基底上制作了该相位型掩模，并对其进行了检测。

关键词：日冕仪；相位型掩模；艾里斑

中图分类号： P111.41 **文献标识码：** A

1 引 言

系外行星的探索是天文学中一个重要的研究课题^[1-4]。在探测太阳系外行星、双星、星际介质时，通常会面临被观测的暗弱天体受到临近较强的恒星光干扰的问题。系外行星的亮度大约比其环绕的恒星低 7 ~ 9 个数量级，如果不能对恒星光进行有效的抑制，会给探测系外行星造成困难。星际日冕仪 (stellar coronagraph) 是一种能获得高对比度成像的光学仪器，可以用于系外行星的探测，它能够极大地减弱干扰光的影响，可以在观测太阳系外行星时起到抑制强烈的恒星光，凸显暗弱的行星光的作用。日冕仪按其工作原理大致可以分为 4 类：干涉仪型^[5]、光瞳函数调制型^[6]、振幅掩模型^[7] 以及相位掩模型^[8-10]。在各种日冕仪中，基于相位掩模的日冕仪具有结构简单、成像质量好、角分辨率很高等诸多优点。其基本原理是利用了光的涡旋特性。其中四分光学掩模星际日冕仪 (FQPM) 是其中的典型代表^[11]。

资助项目：国家自然科学基金 (61308078, 61275170)；中国科学院重大装备研制项目资助 (YZ201446)

通讯作者：谢常青，xiechangqing@ime.ac.cn

本文提出了一种由四分光学掩模星际日冕仪发展而来的十二分光学掩模星际日冕仪。首先介绍了该器件工作的基本原理; 然后利用标量衍射理论对其性能进行了详细的数值分析; 最后, 利用纳米加工工艺在石英基底上制作了该型相位掩模, 并对其进行了初步检测研究。

2 十二分光学掩模星际日冕仪的工作原理

日冕仪是一种用于观测一个亮天体附近的暗弱天体的装置, 如日冕、恒星附近的行星, 其亮度都比亮天体要弱数个数量级。传统的光阑是在望远镜的焦点处放置一块遮光板以遮挡日光或者恒星光, 其原理通常是将恒星光吸收或者反射到不影响暗弱天体的区域, 然后吸收掉。但是当将这种日冕仪用于观测太阳系外行星时, 便会遇到几个问题。

首先是恒星的角直径都几乎为零, 于是在主焦点上的成像尺寸可以认为是受视宁度影响下的艾里斑 (Airy disk), 这个尺寸通常很小, 没有锐利的边缘, 并且艾里斑的外围通常已经包含了角距离较小的行星。于是只有使用较小的挡板, 才不会阻挡行星光, 但是小的挡板会产生严重的衍射现象, 因此在减弱恒星光时传统的日冕仪效果有限。

为了解决以上问题, 在 1997 年, Roddier 等人^[8]提出了采用相位型掩模来替代振幅型掩模的方案, 即将中心的圆形挡光材料换成相位型的掩模, 用以对光的相位进行调制, 而不是简单地进行阻挡。恒星光通过相位掩模后经过衍射与透镜聚焦, 然后被李奥 (Lyot) 光阑阻挡, 从而被大大削弱。在实际应用中, 透明的相位掩模的效果要好于不透明的振幅型掩模。但是 roddier 的掩模也有其缺陷, 它的基本结构是在透明的基板中心加工一个圆盘。对应于不同的望远镜, 就需要加工多种不同尺寸以及相位差的掩模。为了解决这个问题, Rouan 等人结合光学涡旋的原理, 提出了一种四分光学相位型掩模的原理, 对其性能进行了测试, 并将其应用于欧洲南方天文台的 VLT 上进行检测^[12], 得到了较好的效果。

我们的研究工作就是对这种类型掩模进行进一步的拓展, 借助涡旋相位板的概念^[13-15], 将四分光学掩模拓展为十二分的光学掩模, 艾里斑被分割成为 12 个有着不同相位的子光束, 由于不同扇区的光互相干涉作用, 经过衍射后处于李奥光阑以外, 被光阑阻挡而被大大减弱。为了对该型日冕仪的特性进行分析, 我们采用了光的衍射理论对十二分光学掩模星际日冕仪的特性进行数值模拟。

十二分光学掩模星际日冕仪的基本结构如图 1 所示, 恒星光和行星光入射到望远镜主镜 (L1), 聚焦于主焦面上。为了产生一个人造日食的效果, 我们将一个十二分光学相位掩模放置于望远镜主焦面上, 光被相位掩模调制和透镜聚焦, 由于光的干涉效应, 使得恒星光处于光阑之外的位置, 被光阑阻挡而大大减弱, 而较弱的行星光, 被掩模分割成面积各不相同的区块, 研究发现, 掩模板中心区域外的光, 被该系统减弱的程度要远小于掩模板中心的光。

3 日冕仪的性能数值模拟

为了进一步了解该日冕仪, 我们采用光的衍射理论对其进行理论模拟。通过掩模后的光

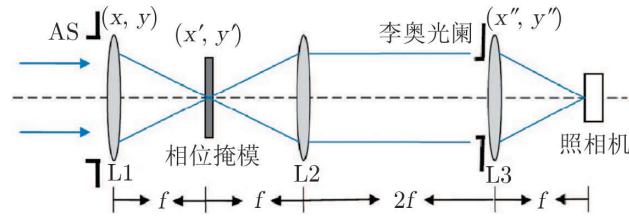
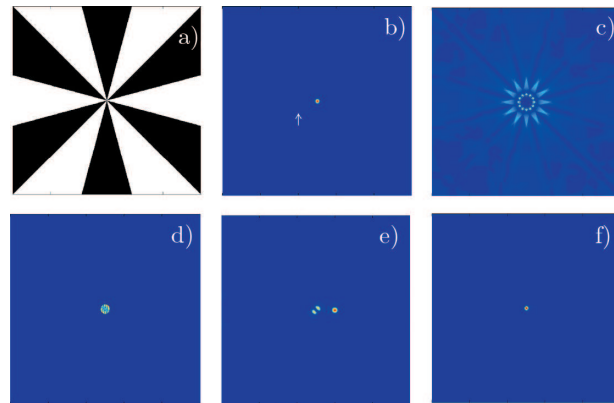


图 1 相位型掩模日冕仪工作原理示意图

场可以写作：

$$u(x', y') = t(\rho, \theta) \frac{\exp(ik\rho^2/2f)}{i\lambda f} \iint P(x, y) U(x, y) \times \exp[-i(xx' + yy')k/f] dx dy ,$$

其中， $t(\rho, \theta)$ 为掩模的透过率函数， $\rho = \sqrt{x'^2 + y'^2}$ ， f 为主镜焦距， λ 为光波长， $P(x, y)$ 为入射光瞳， $U(x, y)$ 为入射光场， $k = 2\pi/\lambda$ 为光波矢。最为重要的因素就是掩模透过率函数 $t(\rho, \theta)$ 。对透过掩模后的光继续采用标量衍射理论进行计算，就可得到相位型星际日冕仪的性能模拟结果，计算结果如图 2 所示。



注：a) 十二分光学相位掩模的示意图，黑白两色分别代表 $0, \pi$ 相位。b) 主焦面上的行星与恒星的艾里斑，中央光斑为恒星，行星位于恒星的左侧箭头所指处，其亮度是恒星的 $1/10\ 000$ ，所以在图中并不能辨认出来。c) 李奥光阑之前的光场分布情况。由于 12 个子光束之间的干涉使得恒星光都处于光阑之外。即中心部分的光强较弱。d) 使用李奥光阑是一个仅有中心部分透光的孔径光阑。光通过光阑之后只有图 c) 中心部分的光能够得以通过。在这个过程中，恒星光大部分被阻挡在光阑之外。e) 通过李奥光阑之后的光通过透镜 L3 后成像于焦平面上，最终得到了恒星光被大幅抑制的图像。图中间为恒星光被抑制后的像，而右侧为行星的像。由于我们设定的恒星光强是行星光强的 10 000 倍。所以可以说明十二分相位型光学掩模可以将行星光对恒星光强度的比值提高一万倍。f) 不使用掩模抑制恒星光时的最终成像结果。其右侧的行星几乎不可见，说明在不借助日冕仪的情况下，观测强光源附近的暗弱天体难度较大。

图 2 十二分光学相位掩模的数值模拟

4 相位型光学掩模制作工艺及器件测试

我们设计制作了一个工作在可见光波段的十二分相位光学掩模, 工作波长为 633 nm。相位型掩模通过调整光通过介质的厚度来实现对相位的调制。介质中的光程与空气中的光程比为介质的折射率。掩模所使用的 JGS3 石英的折射率为 1.55, 通过计算得到所需的刻蚀的石英台阶高度为 570 nm, 可以使得相邻扇区的相位差为 π 。

为了在石英衬底上加工出高度符合要求的台阶, 我们采用微细加工技术进行制作。其基本的制作工艺如图 3 所示。首先利用激光直写工艺制作了振幅型掩模板, 然后在石英表面涂覆一层 AZ6130 型光刻胶, 使用 MA6 型紫外曝光机进行曝光, 并显影。为了将光刻胶图形转移到石英上, 我们采用了感应耦合等离子体刻蚀机 (ICP) 对石英进行刻蚀。通过精确控制刻蚀的工艺条件和时间, 最终达到能够精确控制台阶高度的目的。最后, 我们使用 dektak 台阶仪对所刻蚀的台阶进行测量, 得到的刻蚀台阶高度为 565 nm, 与设计目标值符合得很好。

在相位型掩模制作完成之后, 我们使用三维表面轮廓仪对该型相位掩模的表面轮廓进行测量, 测量的结果如图 4 所示, 测得的台阶高度也与台阶仪测得的相符。并且, 该掩模的图形尺寸也与设计结构相符, 中心部分细微结构也很好制作出来。

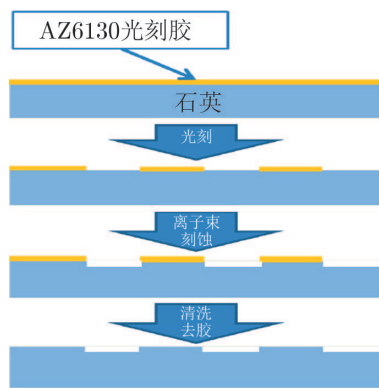


图 3 十二分光学相位掩模的制作工艺流程

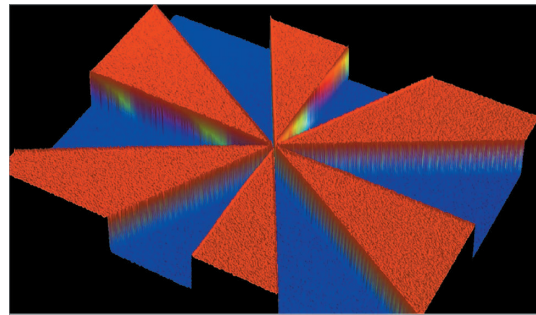


图 4 使用三维表面轮廓仪测量而得到的十二分光学相位掩模的表面轮廓

5 总结

星际日冕仪是一种用于观测系外行星等暗弱天体的辅助装置, 能够抑制其附近较强恒星光光的干扰, 从而达到能够观测到暗弱天体的目的。而相位掩模型日冕仪是其中的一种。本文分析了相位掩模型日冕仪的工作原理, 提出基于十二分光学掩模的星际日冕仪。该日冕仪采用一块按照角度分割为 12 块, 相邻区域的光程相差半波长的相位掩模来实现掩星的作用。本文对日冕仪的结构使用光的衍射理论进行分析, 发现它能够有效减弱恒星光, 同时对行星光的减弱作用也很小, 因此行星光能够更易于被探测到。同时, 我们还采用微纳米加工的方法

在石英基底上制作了该相位型掩模，并对其进行初步的检测。

参考文献:

- [1] Wallace K, Hardy G, Serabyn E. *Nature*, 2000, 406: 700
- [2] Lissauer J J. *Nature*, 2002, 419: 355
- [3] Marois C, Macintosh B, Barman T, et al. *Science*, 2008, 322: 1348
- [4] Serabyn E, Mawet D, Burruss R. *Nature*, 2010, 464: 1018
- [5] Baudoz P, Rabbia Y, Gay J. *A&AS*, 2000, 141: 319
- [6] Kasdin N J, Vanderbei R J, Spergel D N, et al. *ApJ*, 2003, 582: 1147
- [7] Soummer R, Aime C, Falloon P E. *A&A*, 2003, 397: 1161
- [8] Roddier F, Roddier C. *PASP*, 1997, 109: 815
- [9] Mawet D, Riaud P, Absii O, et al. *ApJ*, 2005, 633: 1191
- [10] Mawet D, Serabyn E, Liewer K, et al. *ApJ*, 2010, 709: 53
- [11] Rouan D, Riaud P, et al. *PASP*, 2000, 112: 1479
- [12] Boccaletti A, et al. *PASP*, 2004, 116: 1061
- [13] Foo G, Palacios D M, Swartzlander G R. Jr. *Opt. Lett.*, 2005, 30: 3308
- [14] Mari E, Anzolin G, Tamburini F, et al. *Optics Express*, 2010, 18: 2339
- [15] Ma O R, Cao Q, Hou F Z. *Optics Express*, 2012, 20: 10933

Twelve-Sector Phase Mask Stellar Coronagraph: Numerical Simulation and Fabrication

HUA Yi-lei, XIE Chang-qing

(Key Laboratory of Microelectronic Devices and Integrated Technology, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: In this work, we propose a type of stellar coronagraph with a twelve-sector phase mask. This phase-mask, which can divide the airy disk into twelve parts with π phase difference between two adjacent sectors, is used to replace the amplitude mask in the conventional Lyot coronagraph. The incident light from a distant star is focused on an airy disk. After being focused by a lens, the star light is projected out of the Lyot stop and is weakened dramatically. As light from the planet is not on the center of the phase-mask, it is less affected by the coronagraph and thus easier to be detected. Results from numerical simulations are presented for coronagraph based on scalar diffraction theory. The twelve-sector phase-mask is also fabricated and tested on a sheet of quartz by using nanofabrication method.

Key words: coronagraph; phase-mask; airy disk