

文章编号: 0253-2239(2004)03-378-5

单轴晶体相位型光瞳滤波器*

肖繁荣 王桂英 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 提出了一种基于单轴晶体制作的相位型光瞳滤波器,与普通的相位型光瞳滤波器相比较,单轴晶体相位型光瞳滤波器不仅制作简单,而且相位差有一定的可调节性。与液晶制作的相位型光瞳滤波器相比较,虽然单轴晶体相位型光瞳滤波器的可调节性不如液晶相位型光瞳滤波器,但是单轴晶体相位型光瞳滤波器成本低,而且也不会对光的衰减过大。单轴晶体相位型光瞳滤波器可以实现对焦斑分布的连续调节。通过理论分析和数值计算,论证了单轴晶体相位型光瞳滤波器的可行性,并且具体设计了两区型的单轴晶体相位型光瞳滤波器。

关键词: 物理光学; 光瞳滤波器; 相位型光瞳滤波器; 单轴晶体; 超分辨

中图分类号: O439 文献标识码: A

The Design of Tunable Phase-Only Pupil Filter with Uniaxial Crystal

Xiao Fanrong Wang Guiying Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 10 October 2002; revised 6 March 2003)

Abstract: Pupil filter is an important optical superresolution element. In fabrication, phase-only pupil filter is more difficult than amplitude-only pupil filter. Diffraction optics can be used to fabricate the phase-only pupil filter, but this pupil filter cannot be tunable. The application of liquid crystal in phase-only pupil filter makes the fabrication easy. But the large decrease of intensity and the limited phase changed depth complicate its use in phase-only pupil filter. A new way to fabricate the phase-only pupil filter with uniaxial crystal is put forward. This phase-only pupil filter can be easily used in application. And there is no distinct decrease of light intensity. By numerical calculation, the feasibility of this design is demonstrated.

Key words: physical optics; pupil filter; phase-only pupil filter; uniaxial crystal; superresolution

1 引 言

光瞳滤波器是一种重要的光学器件,它能有效地控制光束在焦点附近空间区域的分布。现在光瞳滤波器应用最为广泛的领域是超分辨领域,特别是与共焦^[1]等新技术的结合。光瞳滤波器主要有振幅型、相位型以及复振幅型。Toraldo di Francia^[2]在1952年首次将超分辨天线的概念引入到光学超分辨领域,并提出和设计了最早的振幅型光瞳滤波器。

* 上海市科学技术发展基金(01DJGK018)、国家自然科学基金(60078025)、国家科技部重大基础研究基金(2002CB713308)资助课题。

E-mail: frxiao@siom.ac.cn

收稿日期:2002-12-10;收到修改稿日期:2003-03-06

早期对超分辨光瞳滤波器的研究,主要集中在各种形式的振幅型光瞳滤波器^[3~5]以及它们的应用^[6,7]。这不仅是因为振幅型光瞳滤波器结构简单、容错性好,当时相位型光瞳滤波器在制作上的困难也是一个重要的原因。制作振幅型光瞳滤波器最简单的方法是对感光乳剂曝光^[8~10]。也可以通过微电子加工或者镀膜来实现。不过由于振幅型光瞳滤波器是通过调节振幅的透过率来改变焦斑强度分布的,因此,这种光瞳滤波器一般会减弱信号的光强,不利于成像。而相位型光瞳滤波器既能克服上述振幅型光瞳滤波器的缺点,又能达到改变焦斑光强分布的目的。Sales等人^[11,12]研究了相位型光瞳滤波器的横向和轴向超分辨特性,指出在同样的超分辨情况下,相位型光瞳滤波器具有更高的中心主瓣强度值。目

前相位型光瞳滤波器的制作主要是利用衍射光学技术。

精确制作光瞳滤波器需要解决许多技术上的难题,再加上研究者为提高成像系统的分辨率设计出了许多复杂花样的光瞳滤波器,这些都更给光瞳滤波器的制作提出了挑战。最近,Davis 等^[13]利用液晶来制作光瞳滤波器,由于液晶的透光率等参量可以通过外加电压控制,因此它能够用来实现多种分布^[14]的光瞳滤波器。不过利用液晶实现单纯的相位调节却不是一件容易的事,为了保证相位调节过程中振幅保持不变,研究者分析了液晶的本征态^[15],并提出了一些解决的方案^[16,17],但这些解决方案中,对入射光的强度衰减都很大。

本文提出了一种基于单轴晶体的相位型光瞳滤波器制作的新途径,利用 e 偏振光通过单轴晶体时所产生的相位偏移取决于光轴与入射光之间夹角这一基本概念,并结合已有的实验条件,通过数值计算论证了该相位型可调光瞳滤波器的可行性。与普通的相位型光瞳滤波器相比,该光瞳滤波器不仅制作简单,而且有一定的可调节性。与液晶制作的可调光瞳滤波器相比较,该光瞳滤波器在应用上要简单得多,而且也不存在对光衰减大的问题。文中首先给出了光瞳滤波器设计的一般理论以及相应的判别标准,并分析了在实际应用中对各因子的取舍;然

后用数值计算的方法详细的论证了利用单轴晶体制作相位型光瞳滤波器的可行性,并说明了具体的实施方案;最后给出了该相位型光瞳滤波器可以实现的几种焦斑分布形式。

2 基本理论

Sales 等^[12]给出的 N 带相位型光瞳滤波器在焦平面上的振幅分布为

$$U(v) = \sum_{j=1}^N \exp(i\phi_j) \times \left[\alpha_j^2 \frac{2J_1(\alpha_j v)}{\alpha_j v} - \alpha_{j-1}^2 \frac{2J_1(\alpha_{j-1} v)}{\alpha_{j-1} v} \right], \quad (1)$$

其中 α_j 第 j 带对应的径向坐标(已被出射光瞳半径 R 归一化), $\alpha_0 = 0, \alpha_N = 1$; 表示第 j 个区域的相位; $J_1(v)$ 为一阶贝塞尔函数。 v 对应像面上的径向坐标 r , u 对应以焦点为原点的轴上坐标 z , 其表达式如下:

$$v = krns \sin \alpha, \quad (2)$$

$$u = kz (n \sin \alpha)^2, \quad (3)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$, $n \sin \alpha$ 代表数值孔径,对浸油或者浸水物镜该值大于 1,一般物镜该值小于 1。

当 $N = 2$ 时为两带相位型光瞳滤波器。设中心部分相位为 ϕ , 半径为 a 。环形区域相位设为零。则在焦平面上光场强度分布

$$I(v) = \left(\frac{2J_1(v)}{v} - a^2 \frac{2J_1(av)}{av} \right)^2 + \left(a^2 \frac{2J_1(av)}{av} \right)^2 + 2 \left(\frac{2J_1(v)}{v} - a^2 \frac{2J_1(av)}{av} \right) a^2 \frac{2J_1(av)}{av} \cos \phi, \quad (4)$$

利用上式我们计算出在普通成像系统中,加入 $a = 1/2, \phi = 0.6\pi$ 的两带相位光瞳滤波器时焦面上的光强分布(图 1 中的实线,而虚线为艾里斑分布)。图 1 是通过编程对(4)式作数值计算得到的。

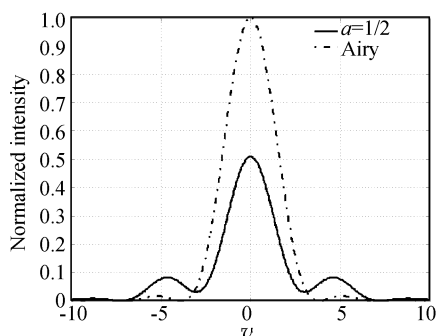


Fig. 1 Lateral pattern of a two-zone phase-only pupil filter with $a = 1/2, \phi = 0.6\pi$. Dashed line is diffraction limit
在设计光瞳滤波器的过程中,通常需要综合考

虑三个评判因子(第一零点比 G 、施特雷尔比 S 、旁瓣强度比 M)^[12] 的变化情况。图 2 是两带相位型光瞳滤波器的三个评判因子值在 $a = 1/2$ 时随相位的变化情况。可以看出,如果 G 值减小的话, M 值就会迅速增大。旁瓣强度的增加,会使系统的信噪比恶

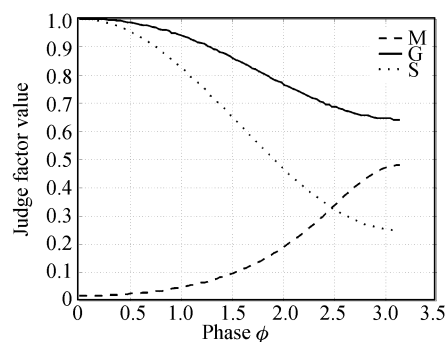


Fig. 2 Lateral properties of a two-zone phase-only pupil filter with $a = 1/2$

化, 在应用中不能获得好的分辨率。所以在设计光瞳滤波器时, 需要考虑具体的应用背景, 优化各因子值的大小, 使得成像的效果最佳。

3 利用单轴晶体的可调节相位型光瞳滤波器

3.1 原理

众所周知, 光在单轴晶体中的传输, 需要分解为 o 光和 e 光两种情况。o 光的偏振方向垂直于主平面(入射光方向与光轴所在平面), 在晶体中的折射率为 n_o , 与入射角方向无关。e 光的偏振方向平行于主平面, 它在晶体中的折射率为 $n_e(\theta)$, 受入射光与光轴夹角的大小影响。e 偏振光平行于光轴入射时, 折射率为 n_o , 垂直于光轴入射时, 折射率为 n_e 。e 光在介质中的折射率与它相对光轴的夹角有如下关系^[18]:

$$n_e(\theta) = \left(\frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} \right)^{-1/2}. \quad (5)$$

e 光在单轴晶体介质中的折射率随入射光与晶体光轴夹角的变化而变化, 这样, 我们就可以通过控制入射光与晶体光轴的夹角来实现对 e 光相位偏移的调节。对于石英晶体, 在 589 nm 入射光波长情况下, 它的主折射率分别为 $n_o = 1.54425$ 和 $n_e = 1.55336$ 。利用(5)式通过数值计算, 可以知道 e 光在介质中的折射率随夹角的变化情况(如图 3 所示)。入射光波长 $\lambda = 589$ nm 时, 对于厚度为 1 mm 的石英晶体, 随光传播方向与光轴夹角变化所能产生的相位变化情况如图 4 所示。

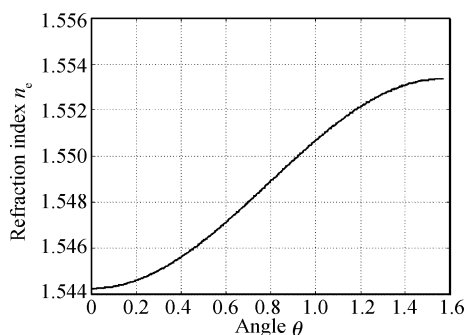


Fig. 3 The refractive index change of extraordinary light in quartz

图 4 中相位变化 2π 所对应的角度变化范围在 0.2 rad 或者 0.4 rad, 根据已知的光学调整架的精度, 实现这样的调节是完全可能的。这也是我们利用单轴晶体设计相位型光瞳滤波器的一个依据和基本出发点。另外, 光通过晶体的衰减可以控制得很

小, 这一点是液晶无法达到的^[16,17]。

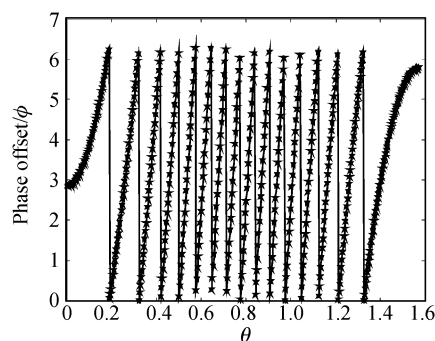


Fig. 4 Phase shift of extraordinary light in quartz

在上面的计算中, 我们忽略了光在介质中的折射效应, 所以图 4 只是简单的反映了在晶体中光的传播方向与光轴夹角变化时, 光穿过晶体所产生的相位偏移变化。在下一部分中, 我们将考虑石英晶体中折射光的相位变化情况。

3.2 可行性分析和具体设计

首先我们分析一下在晶体转动一定角度时, 光线在晶体中的传输情况。图 5 左图是光垂直入射到晶体表面的情况, 虚线为光轴方向, 它与晶体表面法线方向的夹角为 ϕ 。当晶体绕底边旋转 θ 角后, 光线的传输情况如图 5 中右图所示, 利用简单的几何关系我们可以得到光在晶体中传播的方向和穿过该晶体所产生的相位变化:

$$n_a \sin \theta = n_e(\phi + \vartheta) \sin \vartheta, \quad (6)$$

$$\varphi = kn_e(\phi + \vartheta) \frac{l}{\cos \vartheta}, \quad (7)$$

式中 n_a 为空气的折射率, ϑ 为折射角, $n_e(\phi + \vartheta)$ 为介质中 e 光的折射率[具体值由(5)式决定], l 为单轴晶体的厚度, φ 为 e 光穿过晶体后的相位偏移。

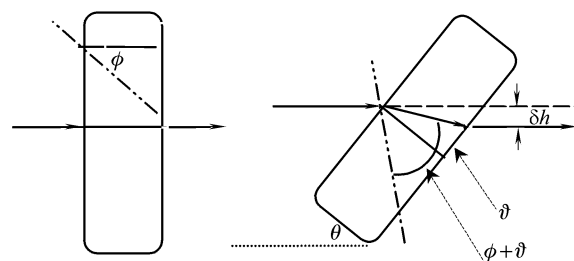


Fig. 5 The geometric relationship among tunable processing

在进行数值计算前, 我们需要先说明一个问题。对于前后表面平行的均匀介质, 如果光线非垂直入射, 光通过介质会产生一个位置偏移, 图 5 中的 δh 就是这样的偏移。经过计算^[18], 可以知道

$$\delta h = \frac{l}{\cos \vartheta} \sin(\theta - \vartheta), \quad (8)$$

式中 δh 是光经过石英晶体后在垂直方向上所产生的

偏移。在我们的设计中 θ, ϑ 都很小(约在 0.02 rad 的量级),所以在设计中我们暂不考虑所带来的影响。

我们取晶体光轴与其表面法线方向的夹角 $\phi = 0.4 \text{ rad}$,利用(5)式、(6)式、(7)式通过数值计算可以得出通过介质后的相位偏移与单轴晶体旋转角度的关系,如图 6 所示。在计算中我们假定石英单轴晶体由折射率为 1.5163 的 K9 玻璃所固定,详细参量在下面的设计中给出。从图 6 中可以知道如果适当地由垂直位置旋转石英晶体的倾角,就能够得到从 π 到 2π 的相位变化。在同样产生 π 相位变化的前提下,零点两侧所需要旋转倾角的范围都是 0.018 rad。已有资料表明现有的光学调整架在角度调节范围为 0.0698 rad ($\approx 4^\circ$) 时,调节精确度可以达到 0.0000349 rad ($\approx 0.002^\circ$),这样的条件已经能够满足上面调节所需要的调节范围和精度。同时,这也说明了利用已有的光学精密调整架,我们可以准连续地从 π 到 2π 调节两带相位型光瞳滤波器的相位差。

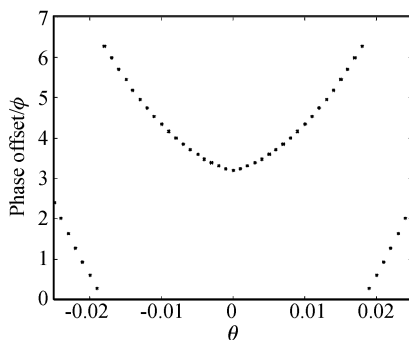


Fig. 6 Phase shift by the rolling of quartz

经过上述分析,我们论证了在实际中利用石英单轴晶体实现相位可调光瞳滤波器的可行性。下面我们给出该光瞳滤波器的具体设计过程。

我们所设计的是一个两带型相位光瞳滤波器,如图 7 所示,其中 r 取为归一化半径, a 为相应的归一

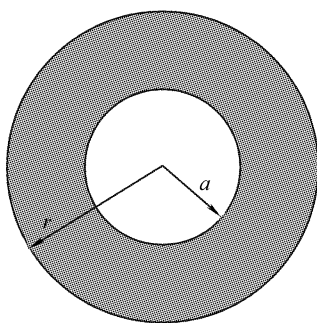


Fig. 7 Two-zone pupil filter

化掩膜半径。中心区域为石英单轴晶体,半径 a 、厚度 1 mm,外圈是半径分别为 r 和 a 、厚度同样为 1 mm 的环形 K9 玻璃(折射率为 1.5163)。两者之间经过一定的工艺加工粘结在一起。然后将它们固定在上述的光学精密调整架上,就可以完成可调节相位光瞳滤波器的主要部分。图 8 是实现石英单轴晶体相位可调光瞳滤波器的光路示意图。首先必须产生一个线偏振的光,而且偏振的方向要平行于光瞳滤波器的入射面。让该线偏振光透过上面设计的滤波器,我们只要适当地调节滤波器的调整架就可以得到不同相位偏移的掩膜效果。

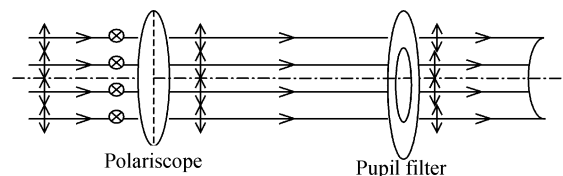


Fig. 8 The sketch map of phase-only pupil filter with uniaxial crystal

结合(4)式,我们计算了在掩膜半径 $a = 1/2$ 时,在普通光学成像系统(图 9)和共焦光学成像系统(图 10)中,加入本文中的光瞳滤波器后,通过调节晶体的倾角可以实现的焦平面上的几种光斑分布。

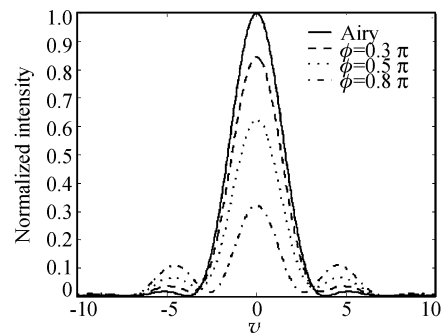


Fig. 9 Conventional optical imaging system

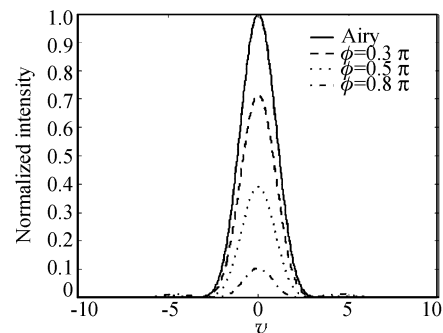


Fig. 10 Confocal optical imaging system

结论 本文提出了一种利用石英单轴晶体实现的相位型可调节光瞳滤波器,不同于衍射光学和液晶所实现的相位型光瞳滤波器,该光瞳滤波器有一定的可调节性,操作简单,而且应用中也不存在对光衰减大的问题。经过理论分析和数值计算,可以看出利用石英单轴晶体实现有一定可调节性的相位型光瞳滤波器是完全可能的。

参 考 文 献

- 1 Ding Z, Wang G, Gu M *et al.*. Superresolution with an apodization film in a confocal setup. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1):360~363
- 2 Deng Xiaoqiang, Liu Li, Yang Lisong *et al.*. Superresolution in 3-D confocal surface profilometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7):853~856 (in Chinese)
- 3 Toraldo di Francia G. Super-gain antennas and optical resolving power. *Nuovo Cimento Suppl.*, 1952, **9**:426~435
- 4 Hegedus Z S. Annular pupil arrays applications to confocal scanning. *Opt. Acta.*, 1985, **32**(2):815~826
- 5 Sheppard C J R. The use of lenses with annular aperture in scanning optical microscopy. *Optik*, 1977, **48**(1):329~334
- 6 Yamanaka Y, Hirose Y, Fujii H *et al.*. High density recording by superresolution in an optical disk memory system. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(2):3046~3051
- 7 Deng Xiaoqiang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Pupil filters improving axial resolution. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(7):966~970 (in Chinese)
- 8 Liu Li, Deng Xiaoqiang, Wang Guiying *et al.*. Phase-only pupil filters improving axial resolution. *Acta Physics Sinica* (物理学报), 2001, **50**(1):49~52 (in Chinese)
- 9 Boyer G. Re'alisation d'un filtrage super-re'solvant. *Opt. Acta.*, 1983, **30**(2):807~816
- 10 Sheppard C J R, Hegedus Z S. Axial behavior of pupil-plane filters. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, **5**(2):643~647
- 11 Sales T R M, Morris G M. Axial superresolution with phase-only pupil filters. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(1):227~230
- 12 Sales T R M, Morris G M. Diffractive superresolution elements. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1997, **14**(3):1637~1646
- 13 Davis J A, Escalera J C, Campos J *et al.*. Programmable axial apodizing and hyperresolving amplitude filters with a liquid-crystal spatial light modulator. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(2):628~630
- 14 Boyer G. New class of axially apodizing filters for confocal scanning microscopy. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 2002, **19**(2):584~589
- 15 Davis J A, Moreno I, Tsai P. Polarization eigenstates for twisted-nematic liquid-crystal displays. *Appl. Opt.*, 1997, **37**(2):937~942
- 16 Barnes T H, Eiju T, Matusda K *et al.*. Phase-only modulation using a twisted nematic liquid crystal television. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(2):4845~4850
- 17 Amako J, Sonehara T. Kinoform using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(2):4622~4630
- 18 Zhao K, Zhong X. *Optics* (second volume). Peking: Peking University Press, 1996. 165~179