

文章编号: 1001-3806(2003)04-0368-03

## 用亚波长正弦介质光栅设计 1/4 波片

卢向东 傅克祥 王植恒 麻健勇  
(四川大学物理科学与技术学院, 成都, 610064)

**摘要:** 采用扩展边界条件法, 得出亚波长正弦介质光栅正入射反射型 1/4 波片的结构参数。发现在一定精度范围内 TE 波与 TM 波的相位差能够在一段较大的槽深区域满足设计要求, 从而降低了实际控制刻蚀深度的难度。讨论了线偏振光转化为圆偏振光的方位角问题。

**关键词:** 亚波长正弦介质光栅; 反射型 1/4 波片; 方位角; 偏振光

**中图分类号:** O434.19 **文献标识码:** A

## Design of quarter wave plate using sinusoidal dielectric subwavelength gratings

Lu Xiangdong, Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Ma Jiangyong

(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, 610064)

**Abstract:** The paper puts forward configurable parameter of reflective quarter wave plate at normal incidence with extended boundary condition method due to absent report about reflective quarter wave plates made of gratings. we find phase difference between TE wave and TM wave can satisfy designed requisition at some accuracy in a long span of groove depth which can reduce practical difficulty of etching groove depth, but papers issued before always require strict etching groove depth. Azimuth problem when lineary polarized light transforms circinal polarized light is discussed at the same time.

**Key words:** sinusoidal dielectric subwavelength gratings; reflective quarter wave plate; azimuth; polarized light

### 引 言

波片是利用双折射特性改变入射光偏振态的器件, 即入射光的 TE 分量(假设电场振动方向只沿  $y$  方向)和 TM 分量(磁场振动方向只沿  $y$  方向)通过波片后分别产生不同的相移, 因此 TE 和 TM 偏振之间的相对位相差(也就是光的偏振态)发生变化。在合适的波长入射下, 1/4 波片能够使其出射的 TE 和 TM 分量的位相差等于  $90^\circ$ 。许多光学仪器都使用 1/4 波片作为偏光器件, 比如椭圆偏仪、磁光数据存储器、空间光开关网络等。以往的偏光器件, 尤其是波片, 绝大多数都是通过解理石英、云母晶体而成, 这是由于石英、云母等双折射晶体的物理性质比较稳定。后来, 人们发现多级波片由于级数的增加, 其厚度随之增大, 相位差受温度的影响也因此无法避免<sup>[1]</sup>, 加上制造单级波片的工艺难度很大, 使应用受到一定的限制。

光栅的出现是随着光谱分析仪的发展而产生的。最初的用途是用在分光仪器中。随着光栅制造业的不断发展和光栅理论的不断深入, 人们在解释光栅现象的同时也发现了光栅的许多新用途。当光栅周期尺寸接近或者小于, 甚至远远小于入射光波长, 人们发现出射光表现出较强的偏振特性。于是人们把光栅的偏振特性应用到偏光器件中。比如: 相位延迟器<sup>[2]</sup>、偏振分束器<sup>[3,4]</sup>和各种波片<sup>[2,5,6]</sup>等。光栅作为偏光器件的研究也在近几年得到深入的发展。Bokor<sup>[2]</sup>等人在光栅周期远小于入射光波长的条件下使用等效介质理论设计出斜入射消色差 1/4 波片, Deguzman<sup>[5]</sup>等人利用耦合波法设计并且制造出正入射条件下的圆偏振光滤波器(把起偏器和 1/4 波片粘合在一起), Lopez<sup>[6]</sup>等人采用多层光栅结构设计出正入射的 1/4 波片。他们所设计的 1/4 波片均是对透射光而言, 衍射效率都比较高。

据现有文献, 未发现有关光栅用作反射型波片的报道。由于某些光学仪器自身设计的需要, 有必要设计反射型的 1/4 波片, 出于这个目的, 作者利用扩展边界条件法从理论上设计出正入射条件下的反射型 1/4 波片, 该波片由亚波长正弦介质光栅构成。

作者简介: 卢向东, 男, 1971 年 1 月出生。硕士研究生。现主要从事光电信号处理方面的研究工作。

收稿日期: 2002-07-17; 收到修改稿日期: 2002-09-02

理论曲线表明, 这种光栅 TE 和 TM 分量之间的相位差能够在一定的槽深范围内基本维持在 90°, 而文献[ 2, 5, 6]中所设计的光栅存在着槽深均要求严格满足一定深宽比关系的缺点(这种缺点导致实际刻蚀中难以达到 too 高的精度要求)。该设计可给实际制造光栅提供便利, 毕竟在实际制造中刻蚀深度受诸多因素所影响。所设计的亚波长正弦介质光栅反射率比较低, 但其制造工艺简单, 商业化成本较低。实际应用中常用 1/4 波片作为线偏振光转变成圆偏振光的器件。因两个本征偏振态的反射率不同, 还进一步讨论了入射线偏振光的方位角问题, 使之在某一方位角的入射下反射光成为圆偏振光。

### 1 基本理论

亚波长光栅其周期尺寸小于所使用的入射光波长, 理论表明此结构的光栅具有较强的偏振特性, 作者采用严格的矢量衍射理论讨论反射光的偏振特性。当光栅的深宽比较小时, 作者利用扩展边界条件法进行讨论。

作者设计的光栅结构图如图 1 所示。其中  $n_0, n_1, n_2, n_3$  分别为空气层、光栅膜层、衬底层、出射层的折射率。 $a_0$  和  $b_0$  分别是入射光振幅和反射光振幅。光栅层厚度为  $d_1 + h$ , 衬底层厚度为  $d_2$ 。光栅的周期为  $g, h$  为半槽深深度, 也就是正弦面形的振幅。假设一束线偏振平面光从上往下垂直入射 ( $\theta = 0$ ), 当入射面平行于  $x-y$  平面时, TE 波和 TM 波相互不耦合, 反射光振幅可以通过这两个本征偏振态矢量合成。具体的扩展边界条件法及其公式推导可以参看文献[ 8~ 11], 这里不再复述。

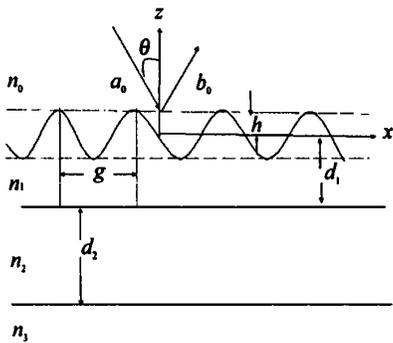


Fig. 1 Configuration of sinusoidal dielectric gratings

为了减少工作量, 在计算 TE 波和 TM 波的反射系数时, 采用文献[ 11] 中的振幅系数矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} Q_{n_0}^- & Q_{d_0}^- \\ Q_{n_1}^+ - RQ_{n_1}^- & Q_{d_1}^+ - RQ_{d_1}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{n_0}^+ & Q_{d_0}^+ \\ Q_{n_1}^- & Q_{d_1}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, 未注明参数的定义参看文献[ 8, 11], 不再复述。通过求解方程 (1) 和 (2), 能求出反射光振幅  $b_0$ 。因为设入射光振幅  $a_0$  为 1, 所以,  $b_0$  也代表了反射光的反射系数。通过求解 TE 波和 TM 波的复反射系数得到两个本征偏振态的相位角, 因此:

$$\Delta = \text{angle}(r_{TM}) - \text{angle}(r_{TE}) \quad (3)$$

式中,  $r_{TE}, r_{TM}$  分别代表 TE 波和 TM 波的反射系数。

实际应用中, 通常用 1/4 波片产生圆偏振光, 由于 TE 波和 TM 波的反射率通常不一致, 需要旋转入射光的方位角  $\Phi$ , 使得反射光的两个本征偏振态振幅相等, 如图 2 所示。设 TE 波的  $E$  场反射系数为  $\xi_{STE}^R$ , 相应的, TM 波的  $E$  场反射系数为  $\xi_{STM}^R, E_0$  的方向表示入射线偏振光的振动方向。要使两个反射光的光强相等, 有:

$$E_0 \cdot \sin(\Phi) \cdot \xi_{STE}^R = E_0 \cdot \cos(\Phi) \cdot \xi_{STM}^R \quad (4)$$

所以方位角  $\Phi$  为:  $\Phi = \tan^{-1}(\xi_{STM}^R / \xi_{STE}^R)$  (5)

只要方位角满足 (5) 式反射光便可得到圆偏振光。

### 2 1/4 波片的设计

采用图 1 所示的光栅结构图, 利用扩展边界条件法设计出以下参数:  $n_0 = 1, n_1 = 1.64$  (Microposit S1800 光刻胶系列),  $n_2 = 1.50, d_1 = 1.245 \lambda, d_2 = 1000 \lambda, \theta = 0$  (正入射情形)。当  $g = 0.8550 \lambda$  时, 如果允许误差范围为  $90^\circ \pm 1^\circ$ , 计算表明  $h$  在  $0.2506 \lambda \sim 0.2903 \lambda$  内能满足设计要求。如图 3 所示。假如

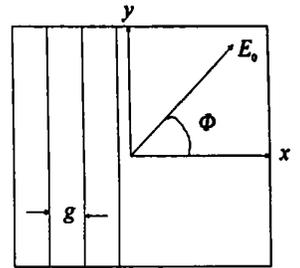


Fig. 2 Azimuth of incident angle

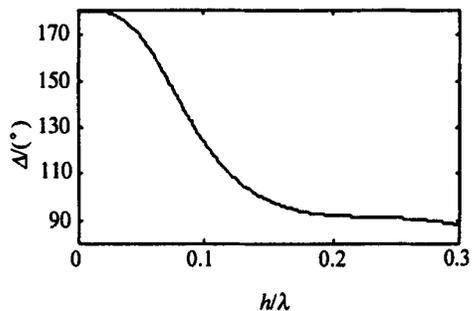


Fig. 3 Relation of phase difference  $\Delta$  and groove depth  $h$

选用 HeNe 激光器作为入射光源, 即  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 按照上面的关系, 槽深在  $158.58 \text{ nm} \sim 183.70 \text{ nm}$  之

间,中间有 25.12nm 的刻蚀深度范围可供选择。若是选用波长更长的光源,则所允许的刻蚀深度范围将会更加宽,这样的性质可以给制造光栅带来了很大的方便,同时也降低了工艺成本。不过,这样的设计也有不足之处,由图 4 不难看出,TE 波的反射率大约在 13% 左右,TM 波的反射率大约从 36% 降至 32%,在误差范围内两个本征偏振态的反射率都较低。对于偏振器件来说较低的反射率并不影响其相位差的变化,这样的设计还是可行的。

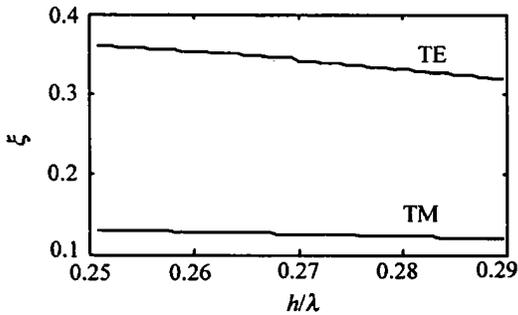


Fig. 4 Relation of reflectivity  $\xi$  and groove depth  $h$

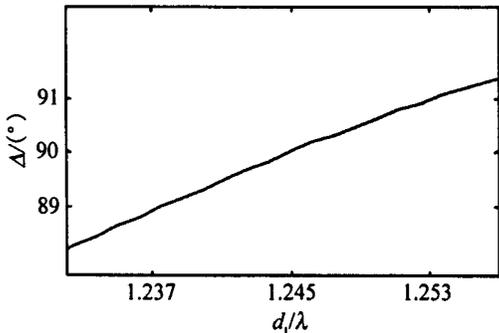


Fig. 5 Relation of phase difference  $\Delta$  and  $d_1$

图 5 是  $d_1$  与相位差的关系,由图可知,在误差范围内( $90^\circ \pm 1^\circ$ ), $d_1$  也可以允许在一定的厚度范围内变化,大约在  $1.237\lambda \sim 1.257\lambda$  之间。如果入射光波长  $\lambda$  为 632.8nm,那么允许厚度误差为 12.656nm。这样的厚度误差也给镀膜工艺减少了许多麻烦。同时作者还研究了相位差与衬底厚度的关系,如图 6 所示。计算表明,在误差允许范围内如果选用 632.8nm 作为入射光,那么衬底厚度允许误差范围是 12.9724nm。同样,要是选用波长更长的入射光,衬底厚度将能在更大的范围内达到要求。

当一束线偏振光正入射到该光栅做成的 1/4 波片时,若不考虑方位角,反射出来的大多数是正椭圆偏振光。在大多数仪器中,需要输出的是圆偏振光。由于两个本征偏振态的反射率不一样,作者通过调整方位角使输出光变为圆偏振光。根据 (5) 式画出方位角与半槽深的关系图。从图 7 可以知道,在误

差范围内的方位角变化范围不超过  $1^\circ$ ,只要调节入射线偏振光的方位角在  $20^\circ$  左右便可以了,给实际使用带来了方便。

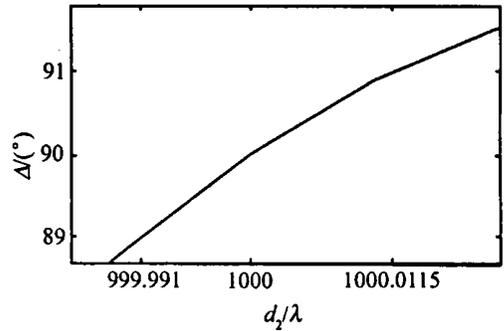


Fig. 6 Relation of phase difference  $\Delta$  and underlayer thickness  $d_2$

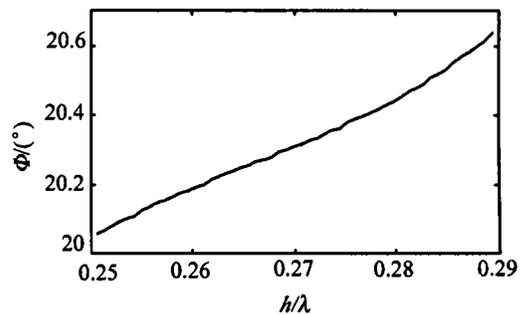


Fig. 7 Relation of azimuth  $\Phi$  and groove depth  $h$

### 3 结束语

所设计的正入射反射型 1/4 波片利用光栅的偏振特性,设计简单,且在满足精度范围内该波片的刻蚀深度、膜层厚度和衬底厚度均能够在一定范围内变化。同时,还就圆偏振光的需要讨论了方位角问题,理论研究表明这样的设计能够给光栅制造带来便利。

#### 参 考 文 献

- [1] 宋连科,李国华,代作晓 *et al.* 光电子·激光,1997,8(6):454~457.
- [2] Bokor N, Shecher R, Davidson N *et al.* Appl Opt, 2001, 40(13): 2076~ 2080.
- [3] Soares L L, Cescato L. Appl Opt, 2001, 40(32): 5906~ 5910.
- [4] Pajewski L, Borghi R, Schettini G *et al.* Appl Opt, 2001, 40(32): 5898~ 5905.
- [5] Deguzman P C, Nordin G P. Appl Opt, 2001, 40(31): 5731~ 6737.
- [6] Lopiz A G, Graighead H G. Opt Lett, 1998, 23(20): 1627~ 1629.
- [7] 臧甲鹏,王朝阳.现代光学仪器,1995(5):46~48.
- [8] Chuang S L, Kong J A. Proc IEEE, 1981, 69(9): 1132~ 1144.
- [9] Chang S L, Kong J A. Radio Sci, 1982, 17(3): 545~ 557.
- [10] Waterman P C. J Acoust Soc Amer, 1975, 57(4): 791~ 802.
- [11] 傅克祥,王植恒,张大跃 *et al.* 中国激光,1999, A26(9): 800~ 802.