

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0086-04

# 亚波长矩形金属偏振分束光栅的分析与设计

赵华君 袁代蓉 程正富

(重庆文理学院电子电气工程学院, 重庆 402160)

**摘要** 将有效介质理论(EMT)和薄膜光学的抗反射设计方法相结合,从理论上分析并设计了 650 nm 工作波长的亚波长矩形金属偏振分束光栅,给出了分束光栅的最佳设计参数,采用严格耦合波理论(RCWA)模拟计算了光栅的偏振分束特性。研究表明,亚波长矩形金属光栅具有形式双折射效应,通过调整占空比,可使光栅层获得介于光栅脊和光栅槽之间的任何大小的有效折射率,克服了光学介质薄膜设计时受膜层材料折射率限制的缺陷;光栅对 TE 偏振表现为金属膜特性,具有高反射,对 TM 偏振表现为介质膜特性,具有高透射,在  $-30^\circ < \theta < 30^\circ$  的大入射角范围和  $470 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$  的宽入射波谱内,具有优良的偏振分束性能。

**关键词** 物理光学;亚波长矩形金属光栅;有效介质理论;薄膜光学;严格耦合波理论

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0086

## A Novel Approach to Design Polarizing Beam Splitters Based on Subwavelength Metal Rectangular Gratings

Zhao Huajun Yuan Dairong Cheng Zhengfu

(Department of Electronic and Electrical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

**Abstract** A novel approach to design the subwavelength metal rectangular gratings used as the polarizing beam splitters was presented. The method was based on effective medium theory (EMT) and thin film optics. The polarizing diffraction performance of subwavelength grating was analyzed by the method of rigorous couple-wave analysis (RCWA) for the wavelength of 650 nm. The numerical calculation was used to analyze the effects of the 0-order diffraction efficiency caused by the grating period, the groove depth, the incident angle and the incident wavelength. The results show that subwavelength metal rectangular grating have the characteristics of metal films with high reflectivity for TE polarization and the characteristics of the dielectric films with high transmission for TM polarization. The optimal design agrees excellently well with the results simulated by RCWA method.

**Key words** physical optics; subwavelength metal rectangular gratings; effective medium theory; thin film optics; rigorous couple-wave analysis

## 1 引 言

偏振光分束器(PBS)是光学系统中的常用光学器件,在光学测量、液晶显示、光纤通信、信息处理等领域有着广泛的应用。传统的偏振光分束器通常由双折射晶体或多层介质膜等具有二向色性的物质构成。双折射晶体体积大、效率低,无法满足光学系统小型化、集成化和高效化的要求,而多层介质膜偏振分束器虽然效率高,但制作工艺复杂,易损伤<sup>[1]</sup>。实

际使用中,通常要求偏振光分束器具备高的消光比与衍射效率、宽的角度适应范围和工作波长、稳定可靠的性能、耐损伤等<sup>[2]</sup>。随着光栅理论研究和微加工技术的深入发展,研究人员逐渐发现亚波长光栅具有优良的偏振特性<sup>[2~8]</sup>,且体积小、效率高、易集成,是制作偏振分束器的理想元件。近年来张亮等<sup>[6,7]</sup>报道了基于金属亚波长矩形光栅的偏振光分束器的设计,周常河等<sup>[1,8]</sup>对深刻蚀石英光栅偏振

**基金项目:** 重庆市教育委员会科研基金(KJ071205)资助课题。

**作者简介:** 赵华君(1974—),男,硕士,副教授,主要从事微光学与衍射光学等方面的研究。

E-mail: zhaohjcu@163.com

分束器的设计进行了报道。

亚波长光栅具有形式双折射效应,可等效为均匀单轴正晶膜层<sup>[5]</sup>,通过调整光栅占空比,可以使光栅层获得介于入射层和基底层之间的任何大小的有效折射率,使膜层的设计更加灵活,克服了光学介质薄膜设计时受膜层材料折射率限制的缺陷。由于亚波长光栅可等效为均匀单轴正晶膜层,因此采用有效介质理论(Effective medium theory, EMT)<sup>[9]</sup>与薄膜光学的抗反射设计方法相结合<sup>[10]</sup>,可准确快捷地计算出光栅的最佳设计参数,避免了传统数值优化算法的相关问题。本文将有效介质理论和薄膜光学的抗反射设计方法相结合,设计了工作波长 $\lambda$ 为650 nm的亚波长矩形金属偏振分束光栅,给出了光栅的最佳设计参数。使用严格耦合波理论(Rigorous coupled-wave analysis, RCWA)<sup>[11]</sup>,详细分析了光栅周期、刻槽深度、入射波长、入射角等参数变化对光栅偏振衍射特性的影响。

## 2 光栅参数的优化设计

光栅周期与入射光波长的关系是决定光栅衍射特性的关键因素,当光栅周期远大于入射光波长时,称为标量衍射区,标量衍射区通常存在多个衍射级次,采用标量衍射理论分析光栅的衍射行为。当光栅周期与入射波长接近时,称为共振区,共振区光栅衍射不稳定,衍射效率随光栅周期等参数急剧变化,这种现象称为瑞利(Rayleigh)反常。发生瑞利反常时,某些衍射级次所对应的衍射角刚好为 $90^\circ$ ,它们处于传播波或倏逝波(存在或消失)的临界状态,因为传播波携带能量,而倏逝波不携带能量,所以在经过临界点时,所有传播波都要调节各自所携带的能量,以保证能量守恒。瑞利反常时波长 $\lambda$ 和入射角 $\theta$ 的关系表示为

$$\lambda = \Lambda(n_2 \pm \sin \theta)/k, \quad (1)$$

式中 $\Lambda$ 为光栅周期, $n_2$ 为光栅基底介质折射率, $k$ 为衍射级次, $k=1$ 表示光栅只存在0级衍射。由(1)式可知,垂直入射时,光栅只存在0级衍射的临界周期 $\Lambda = \lambda/n_2$ 。当 $\lambda = 650 \text{ nm}$ , $n_2 = 1.5$ 时,可计算出垂直入射时的光栅临界周期 $\Lambda = 433 \text{ nm}$ ,此时,如果光栅周期 $\Lambda < 433 \text{ nm}$ ,则只有0级衍射为传播波,其余级次为不携带能量的倏逝波;如果光栅设计周期 $\Lambda > 433 \text{ nm}$ , $\pm 1$ 及以上衍射级次也将逐渐转变为携带能量的传播波,因此要使所设计光栅只包括0级衍射,必须使光栅周期小于临界周期。

光栅周期小于临界周期,称为亚波长光栅,也称

为0级光栅。对于亚波长矩形金属光栅,结构模型如图1所示,平面波以入射角 $\theta$ 入射,反射区和透射区介质的折射率分别为 $n_1$ 和 $n_2$ ,光栅区包含了光栅脊和光栅槽两种介质的周期分布,折射率分别为 $n_r$ 和 $n_g$ 。因为亚波长矩形金属光栅周期小于入射光波长,金属表面的电子在电矢量与光栅刻槽平行的TE偏振(电矢量平行于光栅刻槽)作用下沿栅条自由振荡,使TE偏振的电磁波反射,因此光栅层对TE偏振波等效为金属膜;TM偏振入射时(电矢量垂直于光栅刻槽),电子振荡受阻,因此TM偏振光能够透过光栅层,光栅层对TM偏振波等效为介质膜。由于TE偏振和TM偏振在光栅区具有不同的膜层特性,有效折射率各不相同,并产生形式双折射效应,因此亚波长矩形金属光栅表现出明显的偏振性能。TE偏振和TM偏振入射时光栅区的有效折射率分别表示为<sup>[9]</sup>

$$n_{//} = \sqrt{fn_r^2 + (1-f)n_g^2}, \quad (2a)$$

$$n_{\perp} = 1/\sqrt{fn_r^{-2} + (1-f)n_g^{-2}}, \quad (2b)$$

式中 $f$ 为光栅占空比,即光栅脊宽与光栅周期之比。从(2)式可以看出,通过调整占空比,可以使光栅层获得介于 $n_r$ 和 $n_g$ 之间的任何大小的有效折射率。

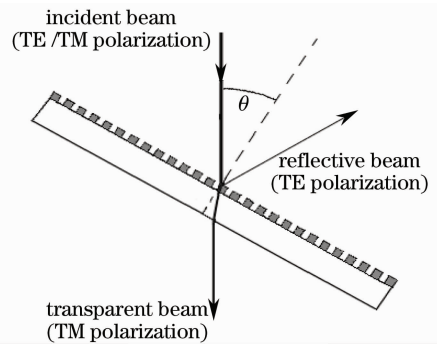


图1 亚波长矩形金属偏振分束光栅结构模型

Fig. 1 Structure of the subwavelength metal transmission gratings for PBS

对亚波长矩形金属光栅,光栅脊(金属层)的折射率表示为

$$n_r = n'_r + k'_r i,$$

将复折射率代入(2)式,可分别计算出TE偏振与TM偏振在不同占空比时的有效折射率值

$$n_{//} = n'_{//} + k'_{//} i, \quad (3a)$$

$$n_{\perp} = n'_{\perp} + k'_{\perp} i. \quad (3b)$$

当 $\lambda = 650 \text{ nm}$ , $n_g = 1.0$ 时,计算铝(Al)金属的有效折射率随光栅占空比变化的关系曲线,如图2所示。由图2可以看出,当占空比 $f = 0$ 时,TE偏振光的有效折射率的虚部 $k'_{//}$ 为0,但随着占空比的

增加  $k'_y$  快速增加, 此时光栅对 TE 偏振入射光表现为金属膜特性, 具有高反射。对 TM 偏振入射光, 当占空比  $f=0$  时,  $n'_x=1.0$ ,  $k'_x=0$ , 此时光栅层有效折射率的实部  $n'_x$  随着占空比的增加逐渐增加, 而虚部值  $k'_x$  始终趋于 0, 因而光栅对 TM 偏振入射光表现为介质膜特性, 具有高透射。利用 TM 偏振入射时光栅具有的介质膜特性并结合薄膜光学的抗反射设计方法, 可准确计算实现 TM 偏振高透射的光栅设计参数。根据薄膜光学单层介质膜的抗反射设计方法<sup>[10]</sup>, 正入射情况下, 当薄膜的折射率  $n = \sqrt{n_1 n_2}$  ( $n_1$  和  $n_2$  分别为反射区和透射区介质的折射率), 并满足  $\lambda/4$  光学设计原理, 即

$$nh = \lambda/4, \quad (4)$$

式中  $h$  为薄膜层厚度, 等效为光栅刻槽深度。满足 (4) 式可使入射面获得最大的增透效果。由于亚波长矩形金属光栅对 TM 偏振波具有介质膜特性, 因此, 要使 TM 偏振透射率达到最大值, 应使光栅对 TM 偏振波的有效折射率  $n'_x = \sqrt{n_1 n_2}$ , 且光栅层的光学厚度为  $\lambda/4$ 。对石英基底 ( $n_2 = 1.5$ ) 的铝 ( $n_1 = 1.47 + 7.79i$ ) 光栅, 当入射光波长  $\lambda = 650$  nm 时, 要实现 TM 偏振的最佳透射, 则需满足  $n'_x = n = 1.22$ , 此时光栅占空比  $f = 0.32$ , 如图 2 所示。由 (4) 式可计算出光栅刻槽深度  $h = 133$  nm。同时, 为了获得稳定的衍射特性, 光栅周期应远小于入射光波长, 即  $\Lambda < \lambda/5 = 130$  nm, 取  $\Lambda = 100$  nm。可见, 垂直入射时, 为了获得最佳的偏振分束特性, 亚波长铝金属光栅的参数应设计为: 周期  $\Lambda = 100$  nm, 刻槽深度  $h = 133$  nm, 占空比  $f = 0.32$ 。

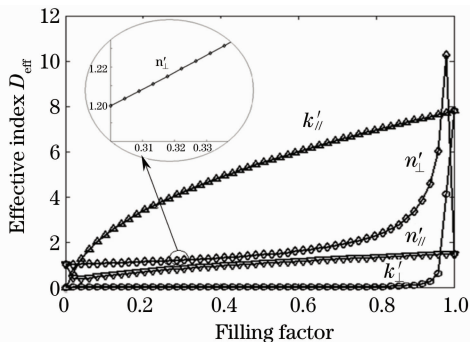


图 2 有效折射率与占空比变化的关系

Fig. 2 Effective index of refraction versus filling factor

### 3 数值计算与性能分析

采用严格耦合波理论法分析入射波长、入射角等参数变化对光栅偏振分束特性的影响。图 3 为  $\lambda = 650$  nm,  $f = 0.32$ ,  $h = 133$  nm 时, 光栅 0 级衍射

效率与周期变化的关系, 从图中可以看出, 当光栅周期  $\Lambda < 130$  nm 时, 光栅衍射效率相对稳定, TE 反射光与 TM 透射光 0 级衍射率分别大于 85% 和 93%, 同时 TE 偏振透射光与 TM 偏振反射光 0 级衍射率趋于零。随着光栅周期的增加, 光栅进入衍射效率相对不稳定的共振区, 当  $\Lambda = 433$  nm 时, 衍射效率出现突变, 这就是瑞利反常现象。这与 (1) 式计算的瑞利反常周期恰好吻合, 证明了本程序的正确性。

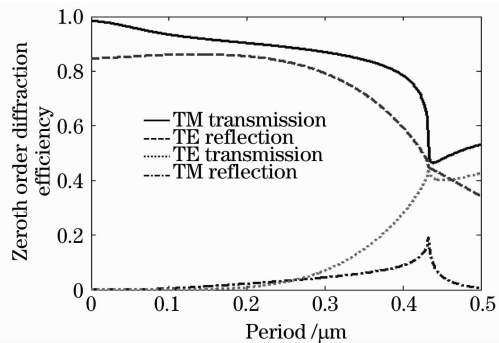


图 3 光栅 0 级衍射效率与周期变化的关系

Fig. 3 Diffraction efficiency of 0th as a function of period

图 4 表示光栅周期  $\Lambda = 100$  nm, 占空比  $f = 0.32$  时 0 级衍射效率随刻槽深度变化的关系, 从图中可以看出, 当光栅刻槽过浅时, 由于金属层厚度不足, 入射光可以透过光栅层, 因此光栅对 TE 偏振和 TM 偏振均具有较大的透射率。随着金属层厚度的增加, 光栅对 TE 偏振光表现出类金属膜效应, 使 TE 偏振反射率快速增加, 当刻槽深度  $h = 133$  nm 时, TE 偏振反射率与透射率分别为 86.02% 和 0.028%, 同时, 对于 TM 偏振透射光, 由于光栅层对 TM 偏振入射光的类介质膜特性, 并满足最佳透射条件, 因此透射率达到最大值 93.44%。而随着刻槽深度的增加, 由于 TM 偏振反射及金属层对光波吸收损耗增加的共同作用, 因此透射率出现快速振荡衰减。可见, 通过有效介质理论和薄膜光学的

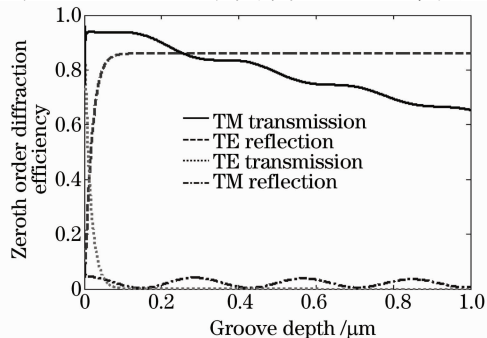


图 4 光栅 0 级衍射效率与刻槽深度变化的关系

Fig. 4 Diffraction efficiency of 0th as a function of groove depth

抗反射设计方法相结合所得出的最佳光栅设计参数具有最佳的偏振分束性能,这与严格耦合波理论法模拟计算的结果是一致的。

图 5 为  $\lambda=650\text{ nm}$ ,  $\Lambda=100\text{ nm}$ ,  $f=0.32$ ,  $h=133\text{ nm}$  时,光栅 0 级衍射率与入射角  $\theta$  变化的关系,可以看出,当入射角  $\theta$  小于  $30^\circ$  时,TE 偏振 0 级反射和 TM 偏振 0 级透射可分别获得大于 86% 和 93% 的衍射效率,而同时 0 级 TE 偏振透射率与 TM 偏振反射率趋近于 0,可见本文设计的偏振分束光栅具有较大的入射角适用范围。光栅 0 级衍射效率与入射光波长变化的关系如图 6 所示,为了便于分析忽略了折射率变化的影响。从图中可以看出,在  $470\text{ nm}<\lambda<800\text{ nm}$  的入射波长范围内,0 级 TM 透射率与 TE 反射率分别大于 90.28% 和 85.75%,0 级 TM 反射率与 TE 透射率分别小于 0.86% 和 0.065%,因此,光栅在较宽波谱范围内能够保持高的偏振分束能力。

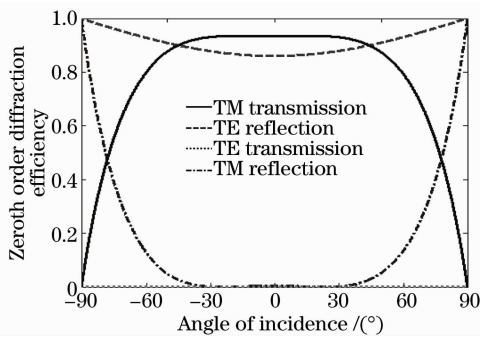


图 5 光栅 0 级衍射效率与入射角变化的关系

Fig. 5 Diffraction efficiency dependence on the incidence angle for both orthogonal polarizations

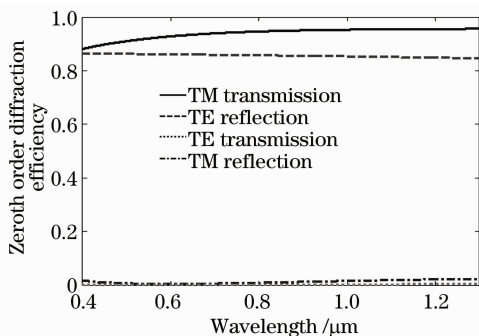


图 6 光栅 0 级衍射效率与入射波长变化的关系

Fig. 6 Diffraction efficiency dependence on the incidence wavelength for both orthogonal polarizations

## 4 结 论

利用亚波长矩形金属光栅对 TE 偏振表现为金属膜特性,具有高反射,对 TM 偏振表现为介质膜特性,具有高透射的物理机制,将有效介质理论和薄膜

光学的抗反射设计方法相结合,从理论上设计了基于 650 nm 工作波长的亚波长矩形金属偏振分束光栅,给出了最佳光栅设计参数,即:周期  $\Lambda=100\text{ nm}$ ,刻槽深度  $h=133\text{ nm}$ ,占空比  $f=0.32$ ,使用严格耦合波理论模拟计算了光栅的偏振衍射特性。研究表明,利用亚波长矩形金属光栅的形式双折射效应,通过调整占空比,可使光栅层获得介于光栅脊和光栅槽之间的任何大小的有效折射率,能够很好地克服光学介质薄膜设计时受膜层材料折射率限制的缺陷;有效介质理论和薄膜光学抗反射设计方法相结合的偏振分束光栅的设计方法,可高效快捷地设计亚波长矩形金属偏振分束光栅,设计的偏振分束光栅具有宽广的入射角和光谱适应范围。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Bo, Zhou Changhe, Wang Shunquan *et al.*. Polarizing beam splitter of a deep-etched fused-silica grating [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(10): 1299~1301
- 2 B. W. Shore, M. D. Perry, J. A. Britten *et al.*. Design of high-efficiency dielectric reflection gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(5): 1124~1136
- 3 Li Jianfeng, Luo Hailu, Guo Yongkang *et al.*. Splitting effect in anisotropic metamaterial [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2027~2033
- 李剑峰, 罗海陆, 郭永康等. 各向异性超常材料的偏振分离特性 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2027~2033
- 4 Zhang Jinlong, Liu Xu, Li Yiyu *et al.*. Polarization beam splitters based on one-dimensional metal-dielectric structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1788~1792
- 张锦龙, 刘旭, 厉以宇等. 基于一维金属-介质周期结构的偏振分束 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1788~1792
- 5 Zhao Huajun. Diffraction characteristics of polarizing beam splitters based on subwavelength dielectric grating [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(10): 1629~1632
- 赵华君. 亚波长介质偏振分束光栅的衍射特性 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(10): 1629~1632
- 6 Zhang Liang, Li Jing, Li Chengfang *et al.*. A novel nano-grating structure of polarizing beam splitters [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(7): 1820~1822
- 7 Zhang Liang, Li Chengfang. Polarization effect of 150 nm subwavelength aluminum wire grating in near infrared [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 467~471
- 张亮, 李承芳. 150 nm 亚波长铝光栅的近红外偏振特性 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 467~471
- 8 Feng Jijun, Zhou Changhe, Zheng Jiangjun *et al.*. Modal analysis of deep-etched low-contrast two-port beam splitter grating [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(21): 5298~5301
- 9 D. H. Raguin, G. M. Morris. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(7): 1154~1167
- 10 B. W. Shore, M. D. Perry, J. A. Britten *et al.*. Design of high-efficiency dielectric reflection gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(5): 1124~1136
- 11 M. G. Moharam, D. A. Pommert, T. K. Gaylord *et al.*. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1077~1086