

文章编号:1004-4213(2010)02-0219-4

线偏光闪耀反射光栅衍射特性研究*

李淑萍, 朱京平[†], 李斌, 唐天同

(西安交通大学 电子与信息工程学院 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

摘要:通过数值方法对线偏光在 Littrow 装置中的理想导体闪耀光栅的偏振特性进行研究. 用时域有限差分程序计算出任意偏振方向线偏光经过闪耀光栅衍射后的电磁场分布, 提取衍射波的 S 偏振和 P 偏振分量, 讨论了与光栅闪耀角和入射光波偏振角的关系. 分析了在 1 530~1 570 nm 光谱范围内, 入射光波为线偏振波和圆偏振波时, 衍射光波的偏振色散特性与光栅闪耀角的关系, 并给出了存在偏振色散的光栅闪耀角范围. 这些分析和结果对工程设计具有一定的指导意义.

关键词:衍射; 偏振特性; 闪耀反射光栅; 时域有限差分法

中图分类号: O436. 3

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103902. 0219

0 引言

波分复用 (Wavelength Division Multiplex, WDM) 技术是解决宽带、大容量光纤通信的一种有效办法, 波分复用/解复用器件是 WDM 系统的关键器件, 其中集成波导光栅型波分复用器具有结构紧凑、性能可靠、易与无源器件集成等优点, 主要有阵列波导光栅 (Array Waveguide Grating, AWG) 型和刻蚀衍射光栅 (Etched Diffraction Grating, EDG) 型两类. 目前的 EDG 型波分复用器核心是闪耀光栅, 而提高闪耀光栅的衍射效率是提高此类波分复用器性能的关键. 在光栅背面镀一层金属形成近理想闪耀光栅是提高刻蚀衍射光栅的衍射效率的有效方法^[1,2,3], 但这类光栅偏振特性对光栅衍射效率的影响研究尚欠完善. Jae-Young Kim 等^[4]用微分法对圆偏振入射光的衍射效率和 Stokes 参量进行了计算, 宋军等^[5]对入射光为 TE 或 TM 波时的罗兰园光栅的偏振特性进行了分析, 但任意偏振光波与光栅闪耀角和入射光波偏振角之间的关系特性分析未见报道.

本文用数值方法研究近理想导体闪耀反射光栅偏振特性. 通过编写的时域有限差分 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 程序, 计算任意偏振光波入射理想闪耀光栅之后的衍射场, 分析波长量级尺度光栅的几何、物理等因素对衍射场偏振特性的影响, 以期为提高 EDG 型光波导波分复用器性能提供理论依据.

1 数值模型和衍射光的偏振态

假设三角形闪耀光栅顶角 90° , x 方向无穷延伸且满足 Floquet 边界条件 (Periodic Boundary Condition, PBC), y 方向无穷大, z 方向采用理性匹配层边界条件 (Perfectly Matched Layer, PML). 定义 H_x, E_y 和 H_z 是非零分量的光波为 P 偏振波, E_x, H_y 和 E_z 是非零分量的光波为 S 偏振波. 根据 Yee 元胞对时间和空间采用中心差分近似, 可以得到有限差分方程. FDTD 方法对空间和时间离散间隔有着基本要求, 空间间隔取波长的 $1/10 \sim 1/20$, 而时间间隔的取样必须满足 Courant 稳定条件^[6]. 根据 FDTD 公式编写程序, 通过对一个理想导体光栅的衍射效率进行计算并与文献的结果^[7]进行对比, 验证了程序的正确性. 在此基础上, 计算一个稳定的光栅衍射场分布, 提取其第 n 阶衍射波, 通过平面波展开^[7]可得

$$u^s(x, z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n (-i\alpha_n x - i\beta_n z) \quad (1)$$

这里

$$\alpha_n = k_0 \sin \theta + 2\pi n/d \quad (2)$$

$$\beta_n = (k_0^2 - \alpha_n^2)^{1/2} \quad (3)$$

式中 k_0 为真空中波矢, θ 和 d 分别为衍射角和刻槽宽度. P 偏振情况下 u^s 代表 E_y , S 偏振情况下代表 H_y . A_n 可通过离散傅里叶变换求解.

z 向传播平面波的电场横向分量 E_x 在入射平面内, E_y 平行于刻槽. 当两个分量的位相差 $\delta = \delta_1 - \delta_2$ 为任意值时, 光波为椭圆偏振, 且椭圆主轴与 x 轴夹角为 ψ . 因此衍射波的偏振态可以通过位相差和两个电场分量的振幅比来确定.

* 国家自然科学基金 (60377020) 资助

[†] Tel: 029-82668643-2732 Email: jpzhu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2009-03-04

修回日期: 2009-08-01

2 数值结果分析

光栅背面镀近理想导体材料—金属银,其在入射波长 $\lambda=1\ 550\text{ nm}$ 处折射率为 $0.45+i0.7$ ^[8].根据光栅闪耀角的大小不同,将衍射分为低调制区(闪耀角在 $1^\circ\sim 10^\circ$)、中调制区(闪耀角在 $10^\circ\sim 22^\circ$)、高调制区(闪耀角在 $22^\circ\sim 38^\circ$)以及超高调制区(闪耀角在 38° 以上)^[9].图1为-1级 Littrow 装置中,入射光波为 45° 线偏振时,闪耀角 $8^\circ\sim 25^\circ$ (中调制区为主)范围内,衍射光波偏振态随光栅闪耀角的变化关系曲线.可见,在该调制区内,衍射光波电场两分量的相位差 δ 均十分接近于 π (偏差小于 $\pm 5\%$),且偏振椭圆主半轴比非常小(均小于 0.04),特别是当 $d=1.6\lambda$ (闪耀角 18.21°)时,主半轴比最小,达 $0.004\ 757$, δ 为 $1.003\ 6\pi$,十分逼近 π ,因而椭圆偏振转化为线偏振.换句话说,线偏振入射光波入射到位于低、中调制区光栅时,衍射光波的偏振态非常接近于线偏振,并且其电矢量振动椭圆方向在二四象限^[10].

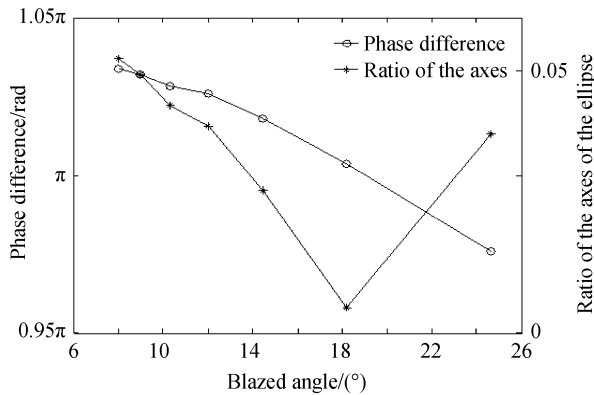


图1 -1级衍射光偏振态随光栅闪耀角变化曲线

Fig. 1 The polarization state of the -1 order diffraction beam changes with blaze angle

图2为 45° 线偏振光被-4级 Littrow 装置闪耀时,衍射光偏振态随光栅闪耀角的变化情况,此时闪

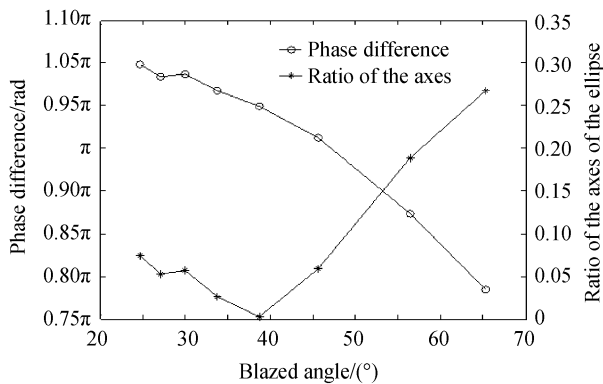


图2 -4级衍射光偏振态随光栅闪耀角变化

Fig. 2 The polarization state of the -4 order diffraction beam changes with blaze angle

耀角为 $25^\circ\sim 65^\circ$.当闪耀角处于 $25^\circ\sim 40^\circ$ (高调制区域)时, δ 大于 π 且电矢量振动椭圆的主轴比小于 0.1 ,说明衍射光波电矢量的振动椭圆是左旋偏振且接近于直线,特别是当 $d=3.2\lambda$ (闪耀角 38.68°)时,主轴比为 0 ,相位差为 π ,衍射光波为线偏振;而闪耀角处于 $40^\circ\sim 65^\circ$ (超高调制区域)时,位相差小于 π ,主轴比迅速增大,衍射波电矢量振动轨迹展宽成典型椭圆,且保持右旋椭圆偏振.

θ 为入射光波电矢量偏振方向与 x 轴的夹角,其中, $\theta=0^\circ$ 对应 S 偏振情形, $\theta=90^\circ$ 对应 P 偏振情形.图3给出了衍射波的偏振态随偏振角 θ 的变化情况.当衍射光波闪耀到-1~-4级次上时,相应的光栅闪耀角在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 范围内,衍射光波的电矢量的位相差在 $\pi<\delta\leq 3\pi/2$ 范围内,电矢量的振动椭圆的主轴比小于 0.1 ,衍射光波是典型的左旋偏振波,并且其电矢量的振动椭圆接近于直线;当衍射光波被闪耀到-5和-6级次上去时,闪耀角大于 40° ,它的电矢量的两个分量的位相差 $\delta\leq \pi$,衍射波的电矢量的振动轨迹是一个典型椭圆,并且是右旋的.以上两点与图2符合很好.从图中还可以看出,对同一级次上的衍射光波来说,其电矢量两个分量的位相差随偏振角的变化而变化,也就是衍射级次确定,衍射光波电矢量振动旋转方向就确定了,不随入射光的偏振方向变化而变化,只是振动椭圆的形状在变化.

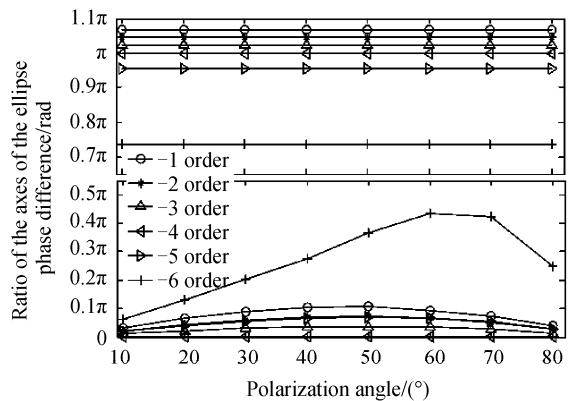


图3 不同闪耀级次上衍射光波的偏振态与入射光波偏振角的关系

Fig. 3 Polarization states of different blazed order diffraction beam change with varying polarization angle for the linearly polarized incident beams

定义偏振特性随波长的变化为“偏振色散”.对于一个偏振角为 45° 的线偏振入射光,图4给出了衍射光波的偏振态在通讯光谱范围 $1\ 530\sim 1\ 570\text{ nm}$ 内的变化.可见,闪耀角在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 范围内时,衍射光波的电矢量分量之间的位相差 δ 和主轴比在该光谱范围内几乎是一个常量,说明光栅闪耀角在低、中、高区域时,各波长在同一级次上的衍射光电矢量的

振动方向和椭圆形状一致性非常好,几乎没有引起“偏振色散”;当闪耀角大于 40° 时,位相差和主轴比曲线不再平坦,尤其是当闪耀角为 69.64° 时,“偏振色散”特别明显,且衍射光波具有椭偏光特点.

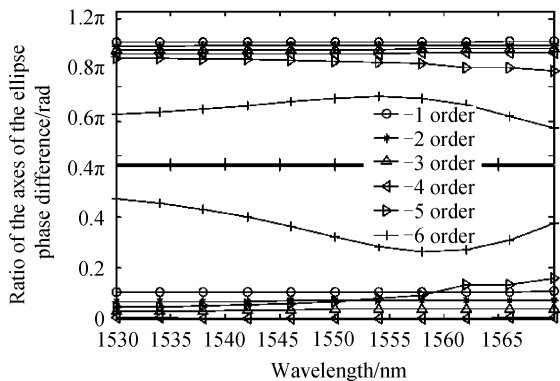


图4 衍射光偏振态在 1 530~1 570 nm 内随波长的变化
Fig.4 Polarization states of diffraction beams change with wavelength in the range of 1 530 ~ 1 570 nm

3 结论

使用时域有限差分数值分析方法研究了线偏振光射入 Littrow 型闪耀反射光栅后衍射光波的偏振态特性.通过计算各种偏振角入射的线偏振光的衍射场,得到不同闪耀角下衍射光场偏振参量,发现:1)低、中、高调制区域衍射光波都是左旋椭圆波,且存在一个特定的闪耀角使得衍射光波几乎是线偏振波,光栅闪耀角一旦大于该值(即进入超高调制区),衍射光波就变成了右旋的椭圆偏振波;2)衍射光波的衍射级次确定,其电矢量偏振旋转方向相应确定,不随入射光的偏振方向变化而变化,只是振动椭圆的椭圆度在变化;3)在 1 530 ~ 1 570 nm 光谱范围内,闪耀角的低、中和高调制区域,各个波长之间几乎没有“偏振色散”,当闪耀角在超高调制区域时,衍射光波存在严重的“偏振色散”特性,与入射光波的偏振态无关.

参考文献

- [1] WEN Hong-qiao, WU Liang, SONG Jun, *et al.* Analysis of retro-diffraction efficiency for etched diffraction gratings using a FDTD method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **31**(11): 1377-1381.
文泓桥,吴良,宋军,等.时域有限差分法分析蚀刻衍射光栅的后向衍射效率[J]. *光子学报*, 2003, **31**(11): 1377-1381.
- [2] LI Shu-ping, TANG Tian-tong, ZHU Jing-ping. Study on the polarization dependency of diffraction efficiency of perfectly conducting blazed gratings[C]. *SPIE*, 2007. **6624**: 66240H1-7.
- [3] MONTIEL F, NEVIERE M. Perfectly conducting gratings: a new approach using infinitely thin strips[J]. *Opt Commun*, 1997, **144**(1-3): 82-88.
- [4] KIM J Y, OH S J. A visual program to calculate efficiency and polarization behavior of diffraction gratings [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2001, **A467-468**: 321-324.
- [5] SONG Jun, HE Jian-jun, HE Sai-ling. Polarization performance analysis of etched diffraction grating demultiplexer using boundary element method [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, **11**(1): 224-231.
- [6] TAFLOVE A. Computation electrodynamics: the finite-difference time-domain method [M]. 3rd ed. Boston: Artech House, 2000.
- [7] PETIT R. Electromagnetic theory of gratings [M]. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1980: 11.
- [8] HASS G, HADLEY L. Optics properties of metals in American institute of physics handbook [M]. New York; McGraw-Hill Inc, 1972: 138.
- [9] NEVIERE M, MAYSTRE D, LOEWEN E G. Grating efficiency theory as it applies to blazed and holographic gratings[J]. *Appl Opt*, 1977, **16**(10): 2711-2721.
- [10] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. YANG Jia-sun, transl. 7th ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2005: 173.
波恩 M, 沃尔夫 E. 光学原理 [M]. 杨葭荪, 译. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2005: 173.

Diffraction Polarization Characteristics for Blazed Reflection Gratings

LI Shu-ping, ZHU Jing-ping, LI Bin, TANG Tian-tong

(*Shaanxi Key Laboratory of Information Photonics Technique, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

Abstract: The polarization states of the diffraction beams of nearly perfect conducting blazed gratings in Littrow mounting are studied by numerical simulation. A FDTD program is written, the electromagnetic fields for various polarized incident beams are calculated, and the polarization states of the diffractive waves are extracted. The relation between the polarization state of the diffraction wave and the grating balzed angle and polarization angle for the linearly polarized incident wave is analyzed. In the spectral range of 1 530 ~ 1 570 nm, the polarization dispersion is studied for the linearly and circularly polarized incident beam. The most important conclusions may be significant for the engineering design.

Key words: Diffraction; Polarization characteristics; Blazed reflection grating; Finite difference time domain method



LI Shu-ping was born in 1967. Now she is working as a Ph. D. degree candidate in physical electronics at Xi'an Jiaotong University, and her research interests focus on electromagnetic field simulation and opto-electronic devices.



ZHU Jing-ping was born in 1967. She received her Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2000. She is a professor, and her current research interests focus on opto-electronic devices, space optics, integrated optics and biomedical photonics.