

引用格式: SUN Guobin, ZHANG Jin, JI Xuesong, et al. Polarization Extinction Ratio Characteristics of Visible Wide-angle Metal Polarization Beam Splitting Grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(12):1205002

孙国斌,张锦,季雪淞,等. 可见光宽入射角度金属偏振分束光栅的消光比特性研究[J]. 光子学报, 2023, 52(12):1205002

可见光宽入射角度金属偏振分束光栅的消光比特性研究

孙国斌¹, 张锦¹, 季雪淞¹, 胡驰¹, 蒋世磊¹, 刘严严²

(1 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

(2 电磁空间安全全国重点实验室, 天津 300308)

摘要:设计出一种工作在可见光波段宽入射角度范围具有高消光比的金属偏振分束光栅。采用等效介质理论对金属偏振分束光栅原理进行定性分析,利用严格耦合波理论和时域有限差分法对金属 Al 光栅进行数值仿真并详细分析了结构参数中周期、高度以及光波长和入射角度等参数对偏振特性的影响。结果表明:当 Al 光栅占空比为 0.5,周期为 0.15 μm ,光栅脊高度为 0.15 μm 时,在 0.4~0.7 μm 波段和 $45^\circ \pm 10^\circ$ 入射角范围内,该金属偏振光栅对 TM 波高透射,对 TE 波高反射,光栅透射消光比平均 35 dB,反射消光比平均 12 dB,最后对制作的金属偏振光栅进行消光比测量,验证了设计结果的正确性。该研究结果对设计和制备高衍射效率、高消光比、宽波段宽入射角度范围的偏振分束器具有较好的实践指导价值。

关键词:亚波长金属光栅;偏振分束;等效介质理论;严格耦合波理论;时域有限差分法

中图分类号:O436.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235212.1205002

0 引言

偏振分束器是偏振光学系统中的重要器件之一,能够快速高效地改变光的偏振特性,或者利用光的偏振特性进行一些物理参量的测试、信息的记录以及特定光学现象的实现等。传统的偏振分束器多基于双折射晶体^[1]和薄膜偏振分束器^[2],但双折射晶体价格较昂贵,体积大,且对入射角度敏感,从而限制了其在光学系统的应用;薄膜偏振光栅由于薄膜结构在空气中易氧化,结构不稳定,且工作带宽也较小。近年来,随着离子束刻蚀、光刻、电子束曝光等微电子工艺技术的迅速发展,光学元件表面微纳结构得以加工制作实现,通过在器件基底材料表面制作微纳光栅结构可以实现光电子器件的偏振^[3]、抗反射^[4]、窄带滤波^[5]、衍射增强^[6]等多种特殊功能,其中偏振功能的主要原理是利用一维亚波长周期型光栅结构对光波的偏振方向敏感的特性,即一维亚波长光栅对 TE 和 TM 偏振光具有不同等效光学性质,也称为形式双折射特性^[7]。

目前,在一维亚波长结构光学特性研究领域中,研究人员多采用等效介质理论和严格耦合波理论去分析各种结构的偏振分束特性,通过调整占空比、周期和波长的大小,得到结构在入射和透射介质之间的任意等效折射率值,使得结构产生多种应用,弥补了传统介质薄膜因种类不全导致折射率受限的缺点^[8]。单层亚波长金属铝光栅^[9]实现了在入射角 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 和 0.47~0.8 μm 宽波段内实现 TM 高透和 TE 高反,但衍射效率低于 90%,对光的损耗较大;双层亚波长金属光栅^[10]实现了在中心波长 0.51 μm 处 TM 偏振光的透射率仅为 71%;双层堆栈结构偏振分束器具有较大的入射角度容差,但其工作带宽较窄且消光比相对较低;夹层嵌入式金属光栅^[11]在 $-27^\circ \sim 27^\circ$ 和 0.747~0.854 μm 波段范围内,光栅透射和反射消光比都大于 20 dB,但波段变化范围较小;双周期结构的金属光栅^[12]在 1~3 μm 的波长范围内可获得较高的偏振衍射效率,但其工艺制

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划(No. 18JS053),电磁空间安全全国重点实验室基金

第一作者:孙国斌, sunguobin@xatu.edu.cn

通讯作者:张锦, zhangjin@xatu.edu.cn;刘严严, lyy13@126.com

收稿日期:2023-06-15;录用日期:2023-09-04

<http://www.photon.ac.cn>

备要求比较严格。

为获得结构简单,易于加工,适用于AR显示组件宽入射角度高消光比偏振分束要求的偏振分束器,本文针对可见光波段设计了一种宽角度亚波长金属偏振分束光栅结构。该结构是微纳米量级,标量衍射理论的近似条件不再适用^[13],因此本文研究采用等效介质理论定性分析金属光栅偏振分束器的基本原理,然后利用基于麦克斯韦方程组的时域有限差分法(Finite-difference Time-domain, FDTD)和严格耦合波理论(Rigorous Coupled-wave Analysis, RCWA)仿真计算并详细分析不同光栅周期、高度等结构参数以及光束波长和入射角度对光栅偏振特性的影响,并根据设计参数进行了制作与实验测试。

1 理论分析

1.1 等效介质理论

当光栅结构周期小于入射光波长 $\lambda(P \ll \lambda)$ 时,这类光栅称为亚波长光栅,亚波长金属光栅的衍射场只有0级衍射,其他级次均为倏逝波。入射光波的TE偏振分量平行于光栅刻槽,光栅对于TE偏振光具有高反射特性;入射光波的TM偏振分量垂直于光栅刻槽,光栅对于TM偏振光具有高透过特性。根据等效介质理论,亚波长金属光栅对入射光的偏振特性等效为双折射效应^[14],其中TE和TM偏振光的一阶近似等效折射率可分别表示为

$$n_{\text{TE}} = [fn_2^2 + (1-f)n_1^2]^{1/2} \quad (1)$$

$$n_{\text{TM}} = [fn_2^{-2} + (1-f)n_1^{-2}]^{-1/2} \quad (2)$$

TE和TM偏振光的二阶近似等效折射率可分别表示为

$$n_{\text{TE}}^{(2)} = [n_{\text{TE}}^2 + \frac{1}{3}\pi^2(P/\lambda)^2 f^2(1-f)^2(n_2^2 - n_1^2)^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$n_{\text{TM}}^{(2)} = [n_{\text{TM}}^2 + \frac{1}{3}\pi^2(P/\lambda)^2 f^2(1-f)^2(n_1^{-2} - n_2^{-2})^2 n_{\text{TM}}^2 n_{\text{TE}}^2]^{1/2} \quad (4)$$

式中, n_1 为光栅槽的折射率,即为空气折射率,其值为1.0; n_2 为光栅脊的折射率; P 为光栅周期; f 为光栅的占空比; λ 为入射光波长。

不同金属材料表现不同的偏振特性,由于铝材料价格合理,且有良好的金属薄膜特性,故选用铝作为金属光栅脊材料。金属材料的折射率为 $n = n' + ik$,将金属铝折射率带入到式(3)和(4)中,分别计算得出TE和TM波入射到金属光栅的等效折射率,如图1。固定占空比 f 为0.5,从图1可以看出,在可见光波段0.4~0.7 μm ,对于TE波,等效折射率的虚部明显大于实部,因而亚波长金属AL光栅对TE波表现为金属特性,有较高的反射性质;对于TM波的等效折射率,折射率虚部相对TE波折射率虚部较小,因而亚波长金属光栅对TM波表现为介质特性,有较高的透射性质,很少部分的光被反射掉^[14]。同时从图1看出,对于亚波长光栅,入射波长在0.40~0.56 μm 之间,TE和TM波等效折射率的实部均小于1,其对应的布儒斯特角的值应

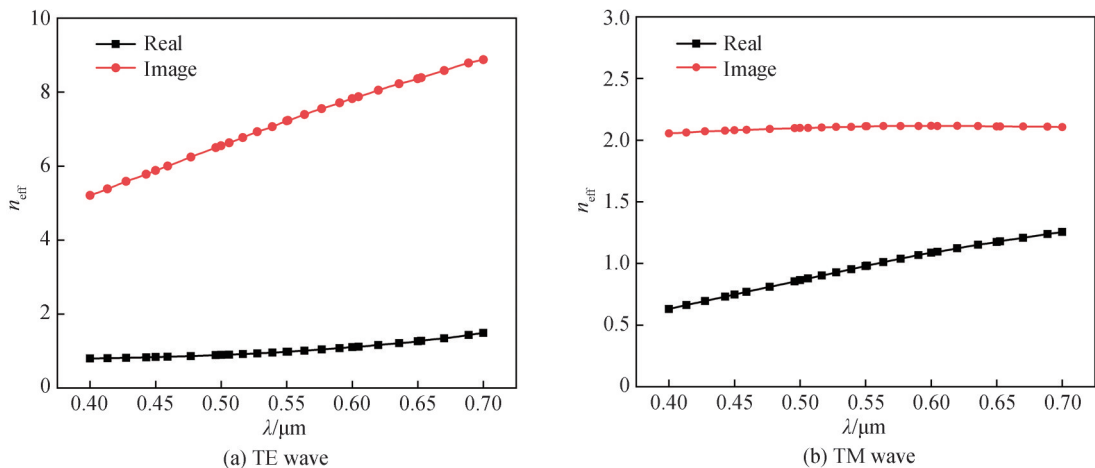


图1 Al金属光栅等效折射率随波长的变化曲线

Fig. 1 Curve of equivalent refractive index of Al metal grating with wavelength

小于 45° ; 在 $0.56\sim 0.70\ \mu\text{m}$ 之间, TE 和 TM 波的等效折射率的实部均大于 1, 布儒斯特角的值应大于 45° 。

1.2 严格耦合波理论

严格耦合波理论(RCWA)是将光栅层的介电常数利用傅里叶级数展开, 推导出耦合波微分方程组; 在不同区域边界上运用电磁场边界条件, 采用矩阵法求解各个衍射级次的振幅和衍射效率^[9,15]。

对于 TM 偏振光入射, 光栅的反射和透射衍射效率可表示为

$$\eta_{Ri} = R_i R_i^* \operatorname{Re} \left| \frac{k_{1,zi}}{k_0 n_0 \cos \theta} \right|, \eta_{Ti} = T_i T_i^* \operatorname{Re} \left| \frac{k_{2,zi}}{k_0 n_0 \cos \theta} \right| \quad (5)$$

对于 TE 偏振光入射, 光栅的反射和透射衍射效率可表示为

$$\eta_{Ri} = R_i R_i^* \operatorname{Re} \left| \frac{k_{1,zi}}{k_0 n_0 \cos \theta} \right|, \eta_{Ti} = T_i T_i^* \operatorname{Re} \left| \frac{k_{2,zi} n_0}{k_0 n_1^2 \cos \theta} \right| \quad (6)$$

式中, R_i 和 T_i 为第 i 级反射和透射的归一化电场振幅, R_i^* 和 T_i^* 分别为 R_i 和 T_i 的共轭, k_0 为波矢, $k_{1,zi}, k_{2,zi}$ 为相位匹配常数, 即 $k_{1,zi} = (k_0^2 n_0^2 - k_{xi}^2)^{1/2}$, $k_{2,zi} = (k_0^2 n_1^2 - k_{xi}^2)^{1/2}$, $k_{1,zi}$ 和 $k_{2,zi}$ 只能取正实数或负虚数, $k_{xi} = k_0 |n_0 \sin \theta - i(\lambda_0/P)|$, P 为光栅周期, λ_0 为入射光波长。

1.3 时域有限差分法

采用基于麦克斯韦方程组的时域有限差分法(FDTD)对硅栅及金属介质组合构成的一维光栅结构偏振性能进行研究^[15], 该方法计算精度高, 尤其是可对复杂结构进行模拟研究。该方法主要原理为将光栅微结构特征单元进行空间和时间网格化, 利用麦克斯韦方程组进行二阶差分求解, 在直角坐标系可表达为式(7)与(8), 通过给定所要计算的电磁目标的初始值和边界条件便能够逐步推进得到各个时刻的空间各点的电磁场的值, 从而得到光栅衍射场内各位置的透射、反射和吸收归一化光强分布情况。

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma_e E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma_e E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma_e E_z \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} = \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_m H_x \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} = \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_m H_y \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} + \sigma_m H_z \end{cases} \quad (8)$$

式中, E_x, E_y, E_z 分别为电场强度的三个分量, H_x, H_y, H_z 分别为磁场强度的三个分量; ϵ 为相对介电常数; σ_e 为电导率; σ_m 为等效磁阻率。

1.4 结构模型

本文设计的金属偏振分束光栅结构模型如图 2。该结构包括 SiO_2 玻璃基底和铝金属光栅脊, 结构的几何参数是 z 方向即沿光栅高度 H 方向, x 方向和 y 方向分别是垂直于光栅刻槽和平行于光栅刻槽的方向, 其中光栅线宽为 L , 周期为 P , 占空比为 f (即 $f=L/P$), 光栅脊高度为 H , 入射光为一束平面波, 以一定角度入射到金属光栅结构表面。

决定光栅衍射性能的主要参数是光栅线宽、周期和光栅脊高度。当光栅周期大于入射波长时, 光栅有很多衍射级次, 不能作为偏振分束器件来使用; 当光栅周期远远小于入射波长时, 光栅只产生零级衍射波, 并且具有很强的偏振分光特性, 光栅会有很好的分束性能^[16]。因此若想要入射光在光栅零级衍射级发生偏振分束现象, 必须满足一定的衍射条件。光栅只存在零级不存在其他高级衍射波的条件为

$$P \leq \lambda / (n_2 + \sin \theta) \quad (9)$$

式中, P 为光栅周期, λ 为入射光的入射波长, n_2 为光栅脊折射率, 选用金属 Al, θ 为入射角度。

当入射光波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$, 光栅脊折射率 $n_2=1.37$, 45° 入射时, 根据式(8)可得, 光栅临界周期 $P \approx 0.29\ \mu\text{m}$ 。

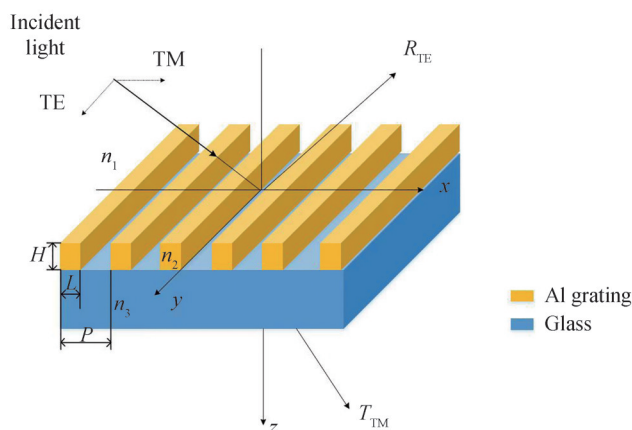


图2 金属偏振分束光栅结构模型

Fig. 2 Structure model of metal polarization beam splitting grating

因此要使设计的光栅只在零级衍射波包含光能量,在其他级次不包含光能量,必须使光栅周期小于临界周期,即小于 $0.29 \mu\text{m}$ 。在零级衍射级次上,通过计算TE和TM波的透射和反射衍射效率^[17],最后得到的透射消光比 T_C 和反射消光比 R_C 分别表示为

$$T_C = 10 \log_{10}(T_0^{\text{TM}}/T_0^{\text{TE}}) \quad (10)$$

$$R_C = 10 \log_{10}(R_0^{\text{TE}}/R_0^{\text{TM}}) \quad (11)$$

2 数值模拟与分析

金属光栅具有复折射率,FDTD软件金属材料数据库内有准确的复折射率系数,仿真计算会更加可靠。因此,在等效介质理论定性的分析基础上,采用基于麦克斯韦方程组的时域有限差分法(FDTD)和严格耦合波理论详细分析讨论光栅周期、光栅脊高度、入射波长以及入射角度对金属光栅偏振分束性能的影响。FDTD仿真模型如图3,在进行FDTD仿真计算时,由于考虑到光栅结构的周期性特点^[15],为减少运算时间,以及避免因限制计算区域而人为引入虚拟边界带来的反射,将计算仿真结构的单个单元区域垂直于入射光传播方向的 x 轴、 y 轴边界均设置为周期性边界条件(Periodic),将平行于入射光传播方向(z 轴方向)的边界设置为完美匹配层(Perfectly Matched Layer,PML),并设置相应的监视器来监视结构阵列以获得金属光栅的反射率、透射率变化情况。

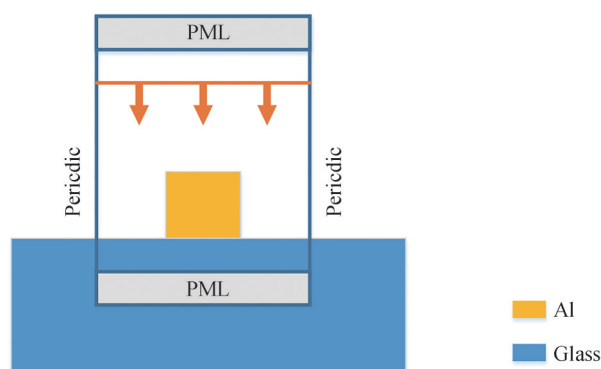


图3 FDTD数值仿真模型

Fig. 3 FDTD structure simulation model

2.1 光栅周期分析

当光栅脊高度 $H=0.15 \mu\text{m}$,占空比 $f=0.5$,入射波长为 $0.6328 \mu\text{m}$, 45° 入射时,周期在 $0.04\sim 0.36 \mu\text{m}$ 范围内以步长 $0.01 \mu\text{m}$ 递增变化,利用FDTD仿真计算金属光栅衍射效率和消光比随光栅周期变化关系,如图4。从图中可以看出,在光栅周期 $P < 0.24 \mu\text{m}$ 时,TE和TM波衍射相对稳定,TE反射光的衍射效率大于

90%,TM透射光的衍射效率大于80%,同时,TE波的透射衍射效率和TM波的反射衍射效率趋于零,透射消光比可达到26.5~75.1 dB,反射消光比可达到8.5~30 dB,因此透射和反射均有较好的偏振分束能力。在 $P=0.06\ \mu\text{m}$ 时,反射和透射消光比可同时达到相对最大值,分别为28.0 dB和75.1 dB;同时也可以看出,当 P 接近 $0.29\ \mu\text{m}$,TM波的反射和透射衍射效率发生突变,不再稳定,光栅不再有良好的衍射特性,此时的光栅周期正好处于光栅的临界周期。因此,采用FDTD算法计算出的临界周期与式(8)计算值吻合,并且在同一波长下,随着周期增大,其反射和透射消光比减小,光栅偏振性能变差。考虑到后续的加工制作,选择周期为 $0.15\ \mu\text{m}$,占空比为0.5的光栅参数。

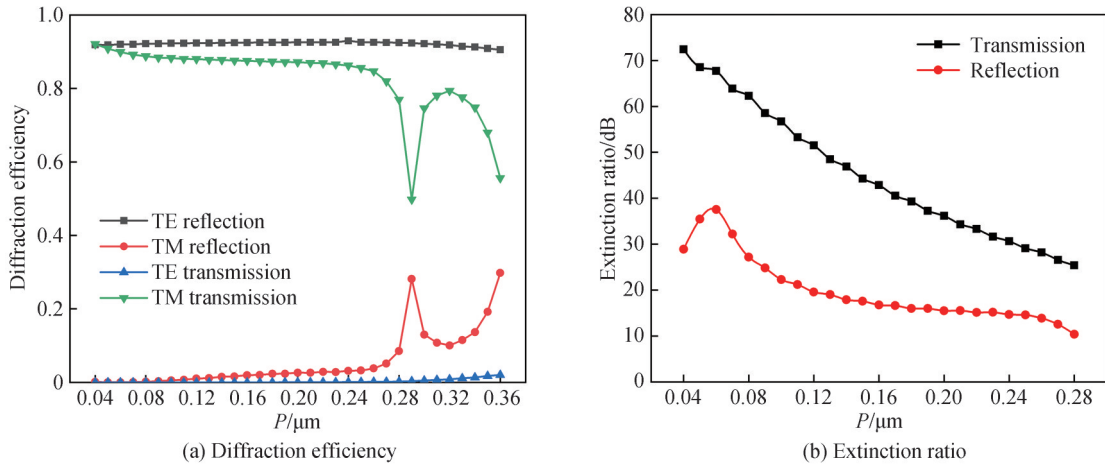


图4 光栅衍射效率和消光比随光栅周期的变化曲线
Fig. 4 Curves of diffraction efficiency and extinction ratio with grating period

2.2 光栅脊高度分析

选择周期 $P=0.15\ \mu\text{m}$,占空比 $f=0.5$,当入射波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$, 45° 入射时,光栅脊高度在 $0.02\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 范围内以步长 $0.01\ \mu\text{m}$ 递增变化,利用FDTD仿真计算入射光经过该金属光栅结构时的光场分布,得到光栅衍射效率和消光比随金属光栅脊高度变化的关系曲线,如图5。光栅脊高度 H 在 $0.02\sim 0.04\ \mu\text{m}$ 变化范围内,TE波和TM波的零级反射与透射消光比随光栅脊高度变化波动较大;光栅脊高度 H 在 $0.04\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 变化范围内,TE波的反射衍射效率和TM波的透射衍射效率波动变化较为平稳,并且分别大于89%和86%;同时,TE的透射衍射效率和TM波的反射衍射效率衍射效率很小,当 $H>0.158\ \mu\text{m}$ 时,衍射效率接近于零。随着光栅脊高度的递增,反射消光比和透射消光比不断提高,最高分别可达到30.2 dB和58.4 dB。TE波的透射衍射效率和TM波的反射衍射效率随着光栅脊高度的增加会迅速减小,因此光栅反射和透射消光

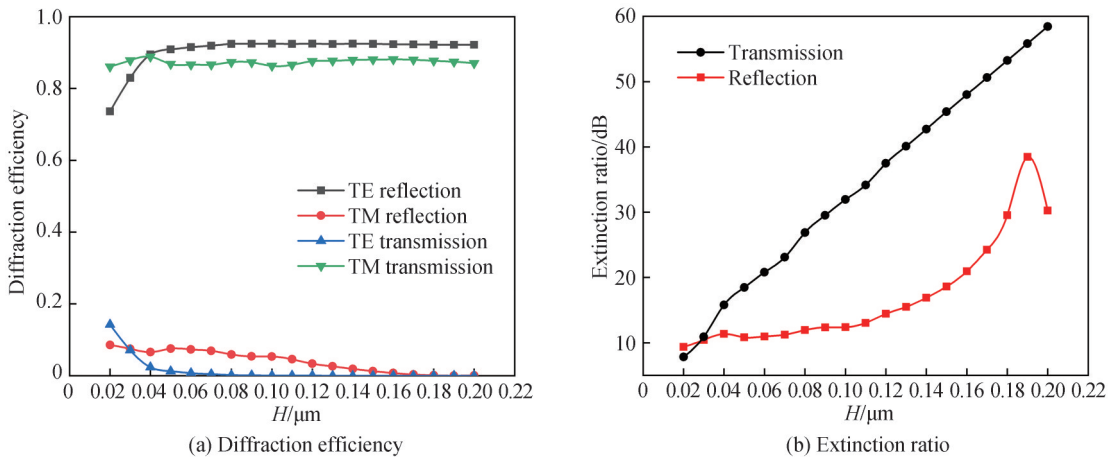


图5 光栅衍射效率和消光比随光栅脊高度的变化曲线
Fig. 5 Curve of diffraction efficiency and extinction ratio with the height of grating ridge

会不断提高。在实际的应用中,大深宽比的光栅难以加工,因此,不宜选择过高的金属脊,在保证消光较高的基础上选取光栅脊高度为 $0.15\ \mu\text{m}$,即深宽比为2:1的金属脊高度参数。

2.3 光栅入射角度分析

当光栅脊高度 $H=0.15\ \mu\text{m}$,光栅周期 $P=0.15\ \mu\text{m}$,占空比 $f=0.5$,入射波长分别取 0.4 、 0.5 、 0.6 、 $0.7\ \mu\text{m}$ 时,入射角度在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内以步长 1° 递增变化,计算在不同入射波长情况下,光栅消光比随入射角度的变化关系,如图6。图6(a)和6(b)分别是通过FDTD算法和RCWA计算得出的光栅消光比随入射角度变化曲线。可以看出,通过FDTD算法和RCWA计算得出的光栅消光比曲线图基本一致,并且在不同的入射波长下,透射消光比随着入射角度的递增均趋于平缓增加变化,但反射消光比除了入射波长为 $0.4\ \mu\text{m}$ 外,在入射波长为 0.5 、 0.6 、 $0.7\ \mu\text{m}$ 时,随着入射角度的递增呈现出先增加后减小的趋势,均会出现一个消光比极大值,相应的极大值点分别为 39° 、 52° 、 57° ,极大值点随着入射波长的递增向后延迟。其原因是TM波入射时,光栅结构对于该偏振光的反射率会等于零(或者接近于零),反射消光比会出现一个极大值,则此时入射波的入射角为布儒斯特角。因此,当入射波长为 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,金属Al光栅的等效折射率小于1,根据布儒斯特定律,当 $n_{\text{eff}} < n_2$ 时,结构的布儒斯特角必须小于 45° ,而当波长为 0.6 、 $0.7\ \mu\text{m}$ 时,金属铝光栅的等效折射率均大于1且随波长增加而递增,即 $n_{\text{eff}} > n_2$ 时,结构的布儒斯特角必须大于 45° ,且角度随波长的增加而递增。

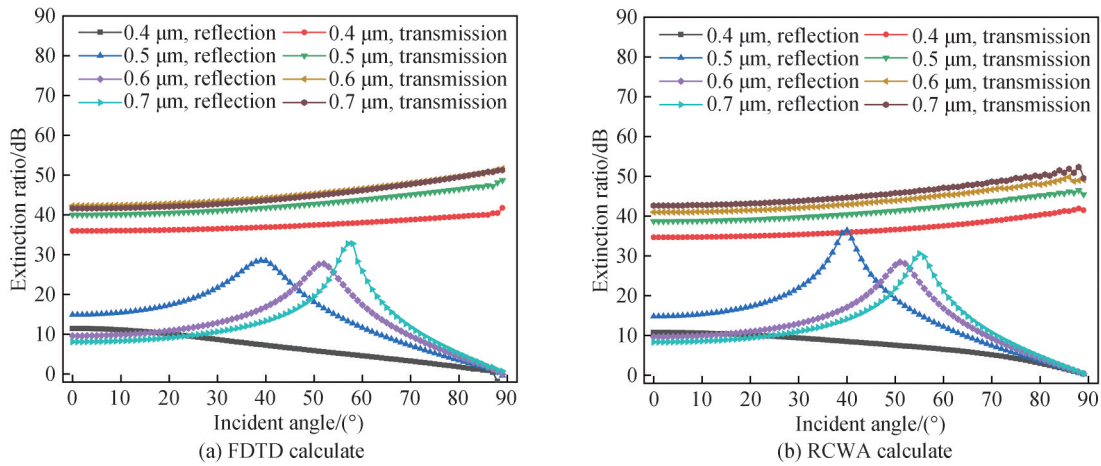


图6 不同算法下计算消光比随入射角度的曲线变化

Fig. 6 Curves of extinction ratio with incident angle calculated by different algorithms

由此可见,该金属光栅在入射角 $45^\circ\pm 10^\circ$ 对TE和TM波有很好的偏振分束能力,在较大入射角度范围内实现了对入射光的偏振分束。

当周期 $P=0.15\ \mu\text{m}$, $H=0.15\ \mu\text{m}$,占空比 $f=0.5$,通过FDTD仿真模拟优化,计算出在不同入射角度下,可见光宽波段范围的光栅消光比曲线,如图7(a);再采用RCWA算法计算出宽波段消光比曲线,如图7(b)。可以看出,两种不同算法计算出的光栅透射和反射消光比曲线图基本一致,并且在不同的入射角度下,透射消光比随着波长递增均趋于平缓递增变化趋势,可到达 $33\sim 48\ \text{dB}$ 左右;反射消光比在不同的入射角度下随入射波长变化均呈现出先增加后减小的趋势,均会出现一个反射消光比极大值,对应的波长极大值点分别为 $0.48\ \mu\text{m}$ 、 $0.50\ \mu\text{m}$ 、 $0.53\ \mu\text{m}$ 、 $0.57\ \mu\text{m}$,反射消光比在入射波长 $0.48\sim 0.65\ \mu\text{m}$ 范围内,入射角度在 $35^\circ\sim 50^\circ$ 范围内均大于 $15\ \text{dB}$,在入射波长 $0.45\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 范围内,入射角度在 $35^\circ\sim 55^\circ$ 均大于 $12\ \text{dB}$ 。由此可见,该金属光栅在宽波段 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 对TE和TM波有很好的偏振分束能力,也在较大入射角度范围内实现了对入射光的偏振分束。

结果显示,所设计的金属偏振光栅在0级衍射级次上对TM波高透射,对TE波高反射,并且在波长范围为 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 和入射角范围为 $45^\circ\pm 10^\circ$ 内,光栅透射消光比和反射消光比都大于 $10\ \text{dB}$,满足设计和制备高衍射效率、高消光比、宽波段大角度的金属偏振光栅的要求。

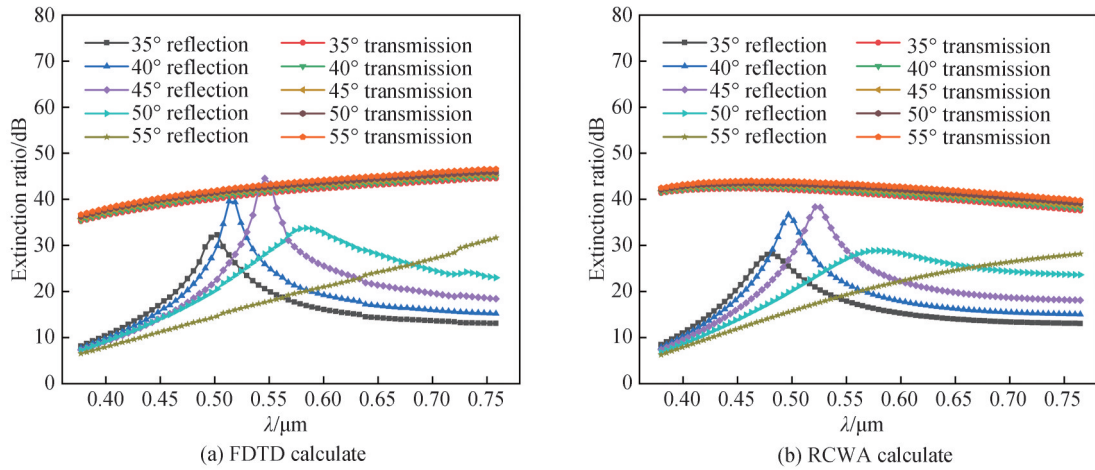


图7 不同算法下计算光栅消光比随入射波长的变化曲线

Fig. 7 Curves of extinction ratio with incident wavelength calculated by different algorithms

3 偏振消光比特性测试

在LAMBDA950分光光度计测试平台上搭建宽波段偏振消光比测试装置,如图8所示,测试系统由待测金属光栅BS,全反射镜M1和M2,可旋转的检偏器P等组成。透射消光比测试装置示意如图8(a),由分光光度计出射的测试光为自然偏振光,经待测金属光栅BS和可旋转检偏器P后由分光光度计的光电探测器接收。旋转检偏器,当分光光度计探测到的光功率最大时,BS透射光偏振方向与检偏器透光轴平行,此时透过检偏器P的出射光是TM波,测量得到的是BS透射的TM波反射率;旋转检偏器,当分光光度计探测到的光功率最小时,此时透过检偏器P的出射光是TE波,测量得到的是BS透射的TE波反射率;通过偏转BS改变入射角度,分别记录不同入射角度对应的光谱透过率数据,根据式(9)计算得出透射消光比。同理,反射消光比测试装置示意如图8(b),分光光度计出射的测试光先经过可旋转检偏器P,再经过反射镜M1反射到待测金属光栅BS表面,反射后再经过反射镜M2,最后由光电探测器接收。旋转起偏器,当分光光度计探测到的功率最大时,BS反射光的偏振方向与起偏器透光轴平行,此时测量得到的是BS反射的TE波反射率;当分光光度计探测到的功率最小时,此时测量得到的是BS反射的TM波反射率;通过设置分光光度计入射角度改变BS入射角度,分别记录不同入射角度对应的光谱透过率数据,由式(10)计算得出反射消光比。同理,搭建入射波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$ 消光比测试装置,如图9所示,光源采用氦氖激光器,激光光束经过起偏器 P_1 和 $1/4$ 波片后变为圆偏振光并入射至待测金属光栅BS和检偏器 P_2 ,利用激光功率计测量检偏器出射光束的光功率值,通过偏转BS改变入射角度,从而测得 $0.6328\ \mu\text{m}$ 波长处不同入射角度的透射消光比和反射消光比。

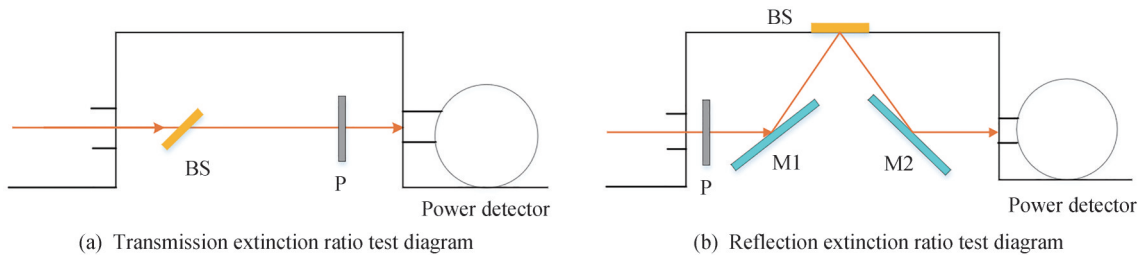


图8 消光比测试装置示意图

Fig. 8 Extinction ratio test diagram

使用搭建的宽波段偏振消光比测试装置在 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 波段和 $45^\circ\pm 10^\circ$ 入射角范围内对占空比为0.5,周期为 $0.15\ \mu\text{m}$,光栅脊高度为 $0.15\ \mu\text{m}$ 的金属光栅进行消光比性能测试。图10给出了测试过程中光栅透射和反射消光比随波长变化的曲线图,可以得出随着波长在 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 范围的变化,测试得到的消光比数据

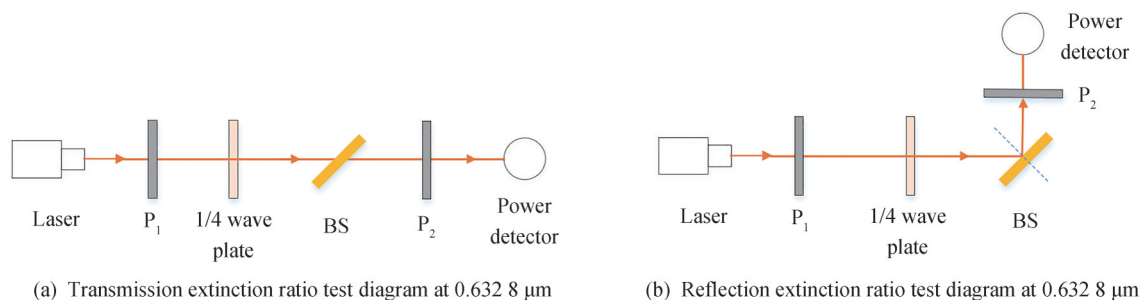


图9 0.6328 μm 消光比测试装置示意图
Fig. 9 Extinction ratio test diagram at 0.6328 μm

与FDTD仿真数据趋势更加接近,但在数值大小存在着一定的差异。图11给出了入射波长为0.6328 μm在不同入射角度下的消光比测试与仿真结果对比曲线,可以看出在0.6328 μm处,反射消光比测试结果数据和曲线趋势与仿真结果基本吻合,透射消光比测试曲线趋势与仿真结果基本一致,但是测试数据数值小于仿真结果。综上,两组测试结果与仿真结果在曲线趋势上基本一致,但是测试结果在数值上均存在一定的偏差,其原因主要有:在测试光路中,每经过一个器件,光强会有一定程度的衰减,导致测试到的消光比都会有所衰减;起偏器或检偏器精度不够高;测试环境中还存在其他波长光的干扰;制作的光栅在结构上存在缺陷等。

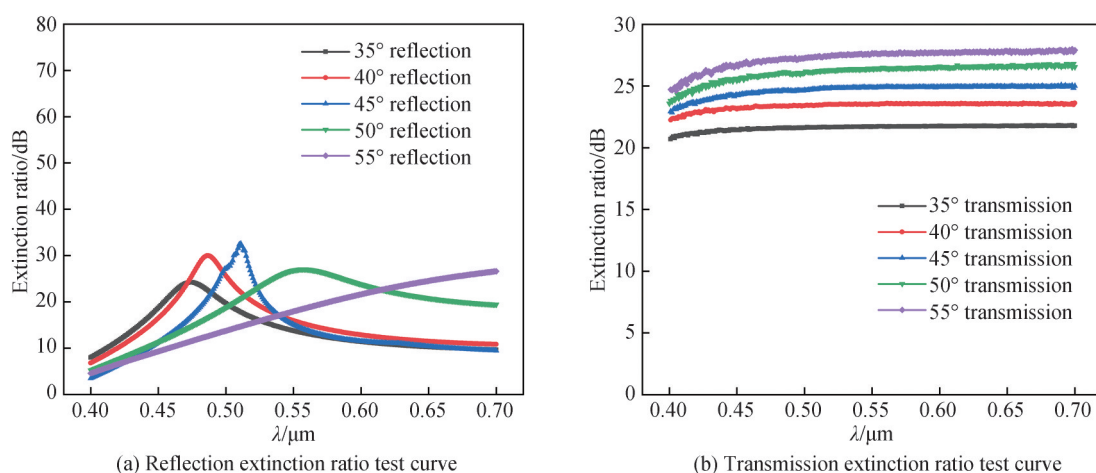


图10 宽波段消光比测试曲线
Fig. 10 Extinction ratio test curve at broad wavelengths

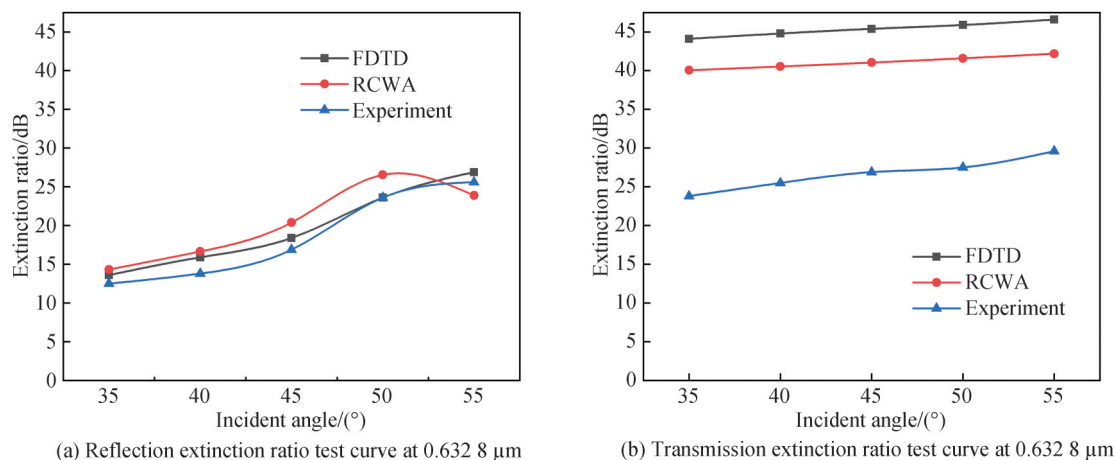


图11 入射波长为0.6328 μm的消光比测试与仿真结果对比
Fig. 11 Comparison of extinction ratio test and simulation with an incident wavelength of 0.6328 μm

4 结论

本文利用等效介质理论定性分析了金属偏振分束光栅的折射率变化情况,然后基于时域有限差分法和严格耦合波理论设计了一种可见光波段的金属光栅偏振分束器,并给出了最佳的结构参数。当Al光栅占空比为0.5,周期为0.15 μm ,光栅脊高度为0.15 μm 时,在0.4~0.7 μm 波段和 $45^\circ \pm 10^\circ$ 入射角范围内,所设计的金属偏振光栅对TM波高透射,对TE波高反射,光栅透射消光比平均35 dB,反射消光比平均12 dB。对制作的金属偏振光栅进行消光比测量,验证了设计结果的正确性,为实现偏振器件在可见光宽波段、宽入射角度范围、高消光比的偏振分束提供了一种新的方法。

参考文献

- [1] YANG Jingshun, HAN Peigao, YAN Yufu, et al. Study on beam splitting characteristics of Wollaston polarizing prism[J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 249-253.
杨敬顺,韩培高,闫玉甫,等.一种Wollaston式偏光棱镜分束特性的研究[J].激光技术,2018,42(2):249-253.
- [2] PENG Hao, CHEN Weidong, YANG Chenying, et al. Design and optimization of broad and polarization beam splitter made from a wave-structured multilayer film[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(13): 211-216.
彭皓,沈伟东,杨陈楹,等.宽波段波状多层膜结构偏振分束器的设计与优化[J].物理学报,2014,63(13):211-216.
- [3] WANG B, CHEN L, LEI L, et al. Diffractive polarizing beam splitter of two-layer grating for operation in reflection[J]. Optics Communications, 2013, 311(2): 307-310.
- [4] LIU Ying, CUI Jie, YAO Guozheng, et al. Study on diffraction, anti-reflection and transmission enhancement of subwavelength relief gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 25-31.
刘影,崔杰,姚国政,等.亚波长浮雕光栅的衍射和抗反射及增透研究[J].光学学报,2016,36(2):25-31.
- [5] PARK C H, YOON Y T, LEE S S. Polarization-independent visible wavelength filter incorporating a symmetric metal-dielectric resonant structure[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23769-23777.
- [6] YU Muxin, ZHOU Wenchao, ZHOU Song, et al. Near-field diffraction enhanced structured light illumination microscopy based on metallic grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 376-383.
余慕欣,周文超,周松,等.基于金属光栅近场衍射增强的结构光照明技术[J].光学学报,2018,38(3):376-383.
- [7] LIU Hanyu, WANG Qingkang. Novel subwavelength optical elements based on nano-structure and their development[J]. Optical Technique, 2006, 32(S1): 18-22.
刘汉玉,王庆康.新兴的纳米结构亚波长光学器件及其发展[J].光学技术,2006,32(S1):18-22.
- [8] WANG Changjiang. Investigation on subwavelength pixelated linear and full Stokes micropolarizer array [D]. Suzhou: Soochow University, 2016.
王长江.亚波长线偏振光栅阵列及全斯托克斯偏振器阵列的理论与实验研究[D].苏州:苏州大学,2016.
- [9] ZHAO Huajun, YANG Shouliang, ZHANG Dong, et al. Design of polarizing beam splitters based on subwavelength metal grating [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6236-6242.
赵华君,杨守良,张东,等.亚波长金属偏振分束光栅设计分析[J].物理学报,2009,58(9):6236-6242.
- [10] CHU Jinkui, WANG Zhiwen, ZHANG Yingjie, et al. Multi-orientated wire-grid polarizer and its application to polarization navigation [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(10): 2237-2244.
褚金奎,王志文,张英杰,等.多方向金属光栅偏振器及在偏振导航中的应用[J].光学精密工程,2012,20(10):2237-2244.
- [11] JI Shuying, KONG Weijin, LI Na, et al. Subwavelength sandwiched metal polarizing beam grating for 800 nm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(8): 188-193.
季淑英,孔伟金,李娜,等.800nm亚波长夹层式金属偏振分束光栅[J].红外与激光工程,2017,46(8):188-193.
- [12] WU Jun, ZHOU Changhe, CAO Hongchao, et al. Broadband polarizing beam splitter with metal-wire nanograting in near infrared region[J]. Optics and Laser Technology, 2013, 47(7): 166-170.
- [13] JI Xuesong, ZHANG Jin, YANG Pengfei, et al. Design of composite micro-nanoscale array structure for 1550 nm absorption enhancement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 124-131.
季雪淞,张锦,杨鹏飞,等.用于1550 nm吸收增强的微纳阵列复合结构设计[J].激光与光电子学进展,2021,58(7):124-131.
- [14] LI Qin. Polarization characteristics and fabrication process of the sub-wavelength metal grating [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.
李琴.亚波长金属光栅偏振特性及制作工艺研究[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [15] JI Xuesong. Study on micro-nano structure array for enhancing the absorption of light [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.
季雪淞.用于增强吸收的微纳阵列结构设计研究[D].西安:西安工业大学,2021.

- [16] FOLEY J M, PHILLIPS J D. Normal incidence narrowband transmission filtering capabilities using symmetry-protected modes of a subwavelength, dielectric grating[J]. *Optics Letters*, 2015, 40 (11) :2637-2640.
- [17] JI Shuying. Study on wide spectrum and wide viewing angle polarization characteristics of subwavelength metal grating [D]. Qingdao: Qingdao University, 2017.
季淑英. 亚波长金属光栅宽光谱、宽视角偏振特性的研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2017.

Polarization Extinction Ratio Characteristics of Visible Wide-angle Metal Polarization Beam Splitting Grating

SUN Guobin¹, ZHANG Jin¹, JI Xuesong¹, HU Chi¹, JIANG Shilei¹, LIU Yanyan²

(1 *School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China*)

(2 *National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin 300308, China*)

Abstract: The polarization beam splitter is one of the essential devices in a polarized optics system, which can change the polarization characteristics of light quickly and effectively. Conventional polarizing beam splitters are expensive, bulky, structurally unstable, and sensitive to the angle of incidence, thus limiting their application in optical systems. In recent years, with the realization of micro-nanostructures on the surface of optical elements, special functions such as polarization, anti-reflection, narrow-band filtering, and diffraction enhancement of optoelectronic devices can be achieved by fabricating micro-nano-grating structures on the surface of the device's substrate material. However, most of these structures working wavelength range, incident angle tolerance, and extinction ratio are essential factors restricting their wide development and application. Therefore, to obtain a polarization beam splitter with a simple structure, easy processing, and suitable for the polarization beam splitting requirement of high extinction ratio at wide incidence angles for AR display components, this paper designs a metal polarization beam splitter grating with high extinction ratio to work in a wide range of incidence angles of visible light bands to address this problem. The metal polarization beam splitting grating principle is qualitatively analyzed using equivalent medium theory, and then effects of the period, height, beam wavelength, and incident angle on the polarization characteristics of the Al grating are numerically simulated by using rigorous coupled wave analysis theory and finite difference time domain method. The results show that when the Al grating duty cycle ratio is 1:1, the period is 0.15 μm , the ridge height is 0.15 μm , in the 0.40~0.70 μm band and $45^\circ \pm 10^\circ$ incident angle range, the metal polarization grating has a high transmission to TM wave and high reflection to TE wave at the 0 order diffraction order, the transmission extinction ratio is 35 dB on average, the reflection extinction ratio is 12 dB on average. Finally, the extinction ratio of the fabricated metal polarization grating is measured, which verifies the correctness of the design results. The test results show that with the change of wavelength in the range of 0.4~0.7 μm , the extinction ratio data obtained from the test are closer to the trend of the FDTD simulation data, but there is a specific difference in the size of the value. The reflective extinction ratio test result data and curve trend are consistent with the simulation results, and the transmittance extinction ratio test result curve trend is consistent with the simulation results, but the test data value is smaller than the simulation results. In short, the test results and simulation results are consistent with the curve trend, but the test results in the numerical value of the existence of certain deviations, which is mainly due to the precision of the optical power meter and the polarization extinction ratio of the polarizer, as well as the production of the grating in the structure of the existence of some defects and so on. The results are helpful for the design and produce of polarization beam splitters with high diffraction efficiency, high extinction ratio, and a wide range of incident angles in a wide band.

Key words: Subwavelength metal grating; Polarization beam splitting; Equivalent medium theory; Rigorous coupled wave analysis theory; Finite difference time domain method

OCIS Codes: 050.6624; 050.1950; 050.1940