

基于多齿谐振光栅的偏振无关宽带反射镜的研究

吴华明^{1,2}, 肖永生³, 黄丽贞³, 肖文波^{1,2}, 段军红^{1,2}, 徐欢欢^{1,2}, 马林飞^{1,2}, 刘宪爽^{1,2}

¹无损检测与光电传感技术及应用国家地方联合工程实验室, 无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;

²江西省光电检测技术工程实验室, 南昌航空大学测试与光电工程学院, 江西 南昌 330063;

³南昌航空大学信息工程学院, 江西 南昌 330063

摘要 主要探讨了一种基于多层多齿谐振光栅结构的高性能偏振无关反射镜。得益于 TE 和 TM 偏振光泄漏模谐振的共存及相互作用, 该器件在 1.65~1.72 μm 较宽的频谱范围内具有反射率大于 97%、角度带宽约为 24.6°、插入损耗小于 0.25 dB、偏振相关损耗小于 0.18 dB 的优越性能。通过严格耦合波分析方法验证了此器件在现有工艺误差范围内具有较好的工艺容差性。

关键词 集成光学; 偏振无关反射镜; 亚波长结构; 多齿光栅

中图分类号 O436.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0913001

Study on Polarization Independent Broadband Reflector Based on Multi-Subpart Profile Resonant Grating

Wu Huaming^{1,2}, Xiao Yongsheng³, Huang Lizhen³, Xiao Wenbo^{1,2}, Duan Junhong^{1,2},
Xu Huanhuan^{1,2}, Ma Linfei^{1,2}, Liu Xianshuang^{1,2}

¹National Engineering Laboratory for Non-Destructive Testing and Optoelectronic Sensing Technology and Applications, Key Laboratory of Non-Destructive Testing, Ministry of Education, Nanchang, Jiangxi 330063, China;

²Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China;

³School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract A high-performance polarization independent reflector based on a multilayered grating structure with multi-subpart profile is discussed. Owing to the advantages of co-existence and interaction of TE polarization light and TM polarization light leaky modes, the proposed reflector can offer combined merits of high reflectivity (over 97%), wide angular bandwidth (about 24.6°), low insertion loss (below 0.25 dB) and low polarization dependent loss (below 0.18 dB) over a broadband spectrum of 1.65-1.72 μm . The rigorous coupled wave analysis method is used to verify the good process tolerance of the reflector in the existing process error range.

Key words integrated optics; polarization independent reflector; subwavelength structure; multi-subpart profile grating

OCIS codes 130.3120; 230.4040; 050.6624; 230.1950

1 引言

通常情况下,光栅对横电(TE)和横磁(TM)偏振光会表现出不同的衍射性质。根据这一性质,基于单层微纳多齿谐振光栅,本课题组设计了一种双功能偏振分束器^[1]。当光垂直入射时,对于 TE 偏振光,该双功能偏振分束器在 1.46~1.58 μm 宽谱范围内的反射率大于 97%;而对于 TM 偏振光,其在 1.55 μm 波长处能

收稿日期: 2017-04-27; 收到修改稿日期: 2017-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(11264031)、江西省自然科学基金(20151BAB207054, 20114BAB201019)、江西省青年科学基金重大项目(20143ACB21011)、航空科学基金(20162856004)、无损检测技术教育部重点实验室基金(ZD201629004)、南昌航空大学研究生创新专项基金(YC2015042)

作者简介: 吴华明(1975—),男,博士,副教授,主要从事微纳光电器件及集成方面的工作。E-mail: Cookey106@126.com

够实现50:50的反射和透射分束比。王志文等^[2]基于等效介质理论分析了单层亚波长金属光栅的偏振透射现象以及光栅参数对偏振透射的影响。有时,光栅的偏振敏感性会限制光栅器件的进一步应用。例如,光信号在光纤传输中的不确定性以及太阳光偏振状态的不确定性,使得对偏振状态敏感的光栅器件在光通信系统及太阳能电池中的应用受到了限制^[3]。为了解决这一问题,Shokooh-Saremi 课题组^[4]基于绝缘体上硅(SOI)材料系统,利用亚波长光栅的泄漏模谐振特性设计了一种宽带偏振无关光栅分束器。之后,该课题组还设计了一种基于谐振光栅二分之一波带片的宽带偏振无关光栅反射镜^[5]。在1500~1600 nm波段范围内,该光栅反射镜对TE和TM偏振光的反射率均大于99%,表现出了较好的偏振无关性能。2010年,Peters等^[6]报道了一种偏振无关的微纳二维光栅谐振滤波器,它对TE和TM偏振光的反射率均大于90%。2011年,Chen等^[7]基于SOI材料系统,利用微纳二维强调制光栅设计了一种高性能的偏振无关光栅耦合器,它的耦合效率可达64%以上,3 dB带宽为65 nm,但此耦合器的结构过于复杂,对制作工艺要求比较高。2010年,Shao等^[8]报道了一种基于T型结构的偏振无关光栅耦合器,在1510~1580 nm波长范围内,它的偏振相关损耗低于0.05 dB,耦合效率高于50%,实现了高效率、偏振无关的耦合功能。2011年,Wu等^[9]报道了一种基于SOI材料系统的二元闪耀光栅结构偏振无关窄带滤波器,它在谐振波长处的反射率大于99%。2014年,Zhang等^[10]报道了一种具有多层光栅结构的宽带偏振无关光栅反射镜,在248 nm带宽范围内,它对TE和TM偏振光的反射率均大于99.5%。2016年,Liu等^[11]提出了一种亚波长光栅结合刻槽波导结构的偏振无关方向耦合器,在中心波长1550 nm处,该耦合器对TE光的耦合效率为97.4%,对TM光的耦合效率为96.7%。

硅基微纳光子器件是实现低成本、大规模集成光电回路的重要元器件^[12-13]。与单齿均匀光栅相比,多齿光栅在设计自由度、操控光栅区域光场分布、控制光栅中泄漏模的衰减、实现宽谱及大角度响应等方面具有巨大优势^[14]。目前对于偏振无关器件的探索还存在一些不足,如结构复杂,对工艺制作要求高,对入射角度敏感及带宽窄等。因此,基于硅材料系统,利用多齿光栅的独有特性,本课题组设计并制作了一种高性能的偏振无关光栅反射镜。对于TE和TM偏振光,该反射镜能在较宽的频谱范围内实现较高的反射率和较低的偏振相关损耗,这使得它在太阳能电池及光通信系统等方面具有重要的应用价值。

2 结构设计及器件的制备与测试

2.1 结构设计

图1为设计的多层多齿光栅偏振无关反射镜的结构示意图。其中, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 为跳变点, t_g 为光栅厚度, t_m 为中间层厚度, t_b 为缓冲层厚度;I、R和T分别表示入射光、反射光和透射光,入射介质为空气,基底为硅。一束平面单色光以 0° 入射角照射到此结构上,通过此结构,TE和TM偏振光在0级都能被高效地反射,从而实现了偏振无关的目的。在设计中,假定光栅在y方向上是无限延伸的,组成光栅的介质材料是无损耗的,且材料的色散忽略不计。材料的折射率参数如下: $n_{\text{air}}=1.0, n_{\text{Si}}=3.48, n_{\text{silica}}=1.47$ 。

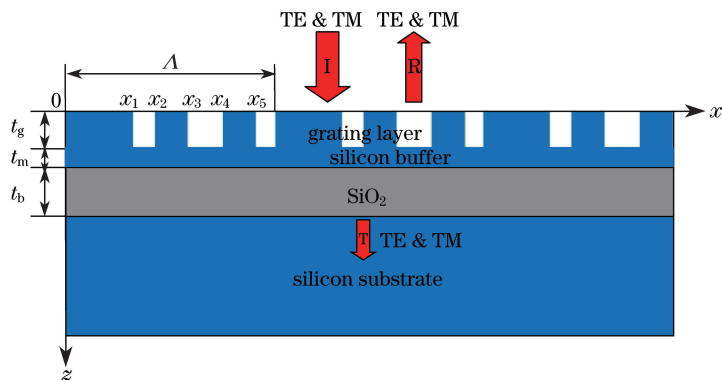


图1 TE和TM偏振光垂直入射时多层偏振无关光栅反射镜的结构示意图

Fig. 1 Schematic of a multilayered polarization independent grating reflector under normal incidence with TE and TM polarization light

对于图 1 所示的结构,为了达到目的,需要对光栅周期 Λ 、 t_g 、 t_m 以及跳变点进行优化。而对于入射角度 θ 、 t_b 及材料的折射率,则可根据实际情况先给定合适的值。拟采用严格耦合波分析方法^[15-16]结合粒子群优化算法^[17-18]对图 1 所示的结构进行设计和优化。

根据粒子群优化算法,选定 Λ 、 t_g 、 t_m 以及光栅跳变点进行优化。因此,定义 $\mathbf{X}=[\Lambda \ t_g \ t_m \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]$ 为粒子。

适应度函数取最小均方误差函数:

$$F = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{\lambda_j} [R_{\text{desired}}(\lambda) - R_{\text{design}}(\lambda)] \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

式中 $R_{\text{desired}}(\lambda)$ 为要求的反射率, $R_{\text{design}}(\lambda)$ 为根据粒子群优化算法及严格耦合波分析法计算得到的反射率, M 为波长取样点数, λ 为波长。

据此算法,优化得到的参数如下: $x_1 = 0.37$, $x_2 = 0.5$, $x_3 = 0.58$, $x_4 = 0.8$, $x_5 = 0.9$, $\Lambda = 1 \ \mu\text{m}$, $\theta = 0^\circ$, $t_g = 0.64 \ \mu\text{m}$, $t_m = 0.04 \ \mu\text{m}$, $t_b = 1 \ \mu\text{m}$ 。

2.2 器件制备

由于所设计的器件尺寸为纳米量级,常规的光刻工艺很难保证器件尺寸的精度,因此拟采用电子束光刻技术进行制备。首先在 SOI 基片上涂覆一层光刻胶,再通过电子束曝光和显影得到光栅的电子束光刻胶图形,然后利用感应耦合等离子(ICP)刻蚀技术将光栅的光刻胶图形转移到基片的上层硅芯层,去除残余的光刻胶后即可得到光栅器件^[19]。

在器件的制备过程中,电子束光刻和 ICP 刻蚀工艺最为关键,电子束光刻工艺中的曝光剂量采用 $240 \ \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。在 ICP 刻蚀工艺过程中,为了减弱侧向刻蚀,采用 Bosch 工艺在刻蚀光栅的侧向边壁沉积一层抗刻蚀的保护层,这一过程是通过交替转换刻蚀气体和保护气体实现的。采用扫描电镜(SEM)观察器件的形貌,如图 2 所示。

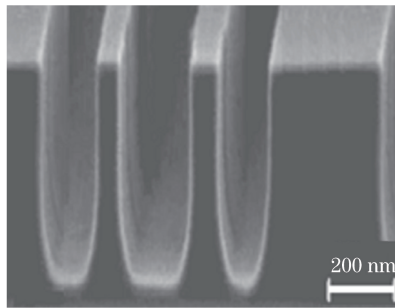


图 2 器件的 SEM 形貌

Fig. 2 SEM image of the reflector

2.3 性能测试及结果分析

为了对理论设计进行实验验证,对图 2 所示的器件进行性能测试,主要测试器件的反射谱、角度谱、插入损耗以及偏振相关损耗。器件的测试流程大致为:从可调谐激光器输出的光经显微物镜准直、扩束后,再经偏振片形成 TE 或 TM 偏振光,最后聚焦到样片上,经样片反射的光经透镜再到分束器,之后被反射到另一个显微物镜,最后经单模光纤输入到光功率计中。在测试中,为了消除实验元件(如可调谐激光器、显微物镜等)损耗对测试结果的影响,将测得的银镜反射率(在 $1.1 \sim 20 \ \mu\text{m}$ 范围内,反射率不低于 98.5%)作为参考值。样片的测试结果是根据银镜的反射率推算得到的。

图 3(a)显示了该偏振无关反射镜的理论反射谱线和实验反射谱线。理论分析表明:对于 TE 偏振光,在 $1.54 \sim 1.84 \ \mu\text{m}$ 波段范围内,器件的反射率大于 0.99,而实验测得器件在 $1.56 \sim 1.8 \ \mu\text{m}$ 范围内的反射率大于 0.97;对于 TM 偏振光,器件在 $1.62 \sim 1.76 \ \mu\text{m}$ 波段范围内的反射率大于 0.99,而实验测得在 $1.65 \sim 1.72 \ \mu\text{m}$ 波段范围内的反射率大于 0.97。为了清楚地显示该器件的高反射率和宽带特性,给出了对数坐标下的透射谱线。由图 3(b)可以看出:在 $1.55 \ \mu\text{m}$ 和 $1.80 \ \mu\text{m}$ 处,TE 波各存在一个透射谷点,其分别对应着一个泄漏模谐振点^[20],表明此器件的高反射率及宽带特性来源于这两个泄漏模谐振点的共存及相互作用;TM 偏振

光在 $1.63 \mu\text{m}$ 和 $1.71 \mu\text{m}$ 处各存在一个泄漏模谐振点,它们的共存及相互作用也会造成此器件的高反射率及宽带特性;在所关注的波段范围内($1.62 \sim 1.76 \mu\text{m}$),TE 和 TM 偏振光泄漏模谐振的共存及相互作用造成了此器件的偏振无关特性。

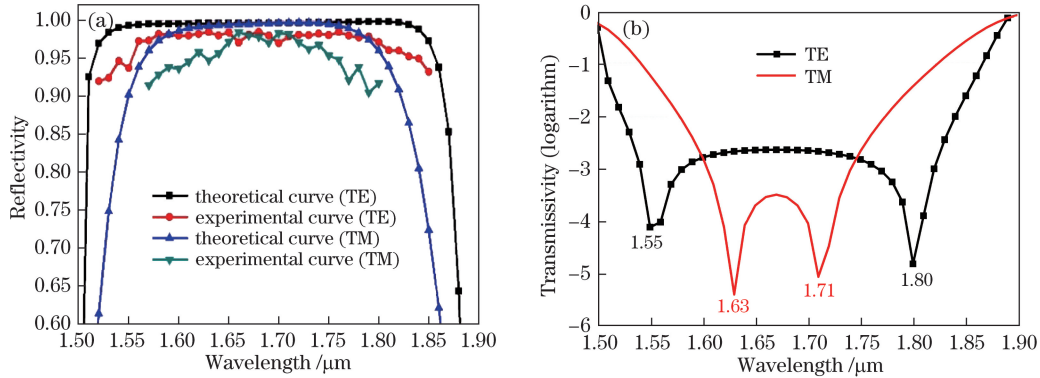


图 3 TE 和 TM 偏振光垂直入射时器件的(a)反射谱和(b)透射谱

Fig. 3 (a) Reflectance and (b) transmittance spectra of the reflector normally illuminated by both TE and TM polarized light

此外,泄漏模谐振的共存及相互作用还与构成材料的高折射率差及顶层多齿光栅的性质有关。高折射率差的光栅层能够扩展谐振区域,从而有利于高反射率和宽带特性的形成;而且,顶层多齿光栅能够有效防止 TE 和 TM 偏振光泄漏模的快速衰减,这大大增加了 TE 和 TM 偏振光获得宽带、高反射率的可能性;高折射率的中间层与光栅层共同起着波导的作用,能增大对泄漏模场的限制能力,从而增加高反射率带宽。如图 4(a)所示,对于 TE 偏振光,40 nm 厚的中间层能够将高反射率(大于 0.99)区从 70 nm($1.51 \sim 1.64 \mu\text{m}$)扩展到 300 nm($1.54 \sim 1.84 \mu\text{m}$)。而对于 TM 偏振光,中间层同样也能增强器件的性能,如图 4(b)所示。

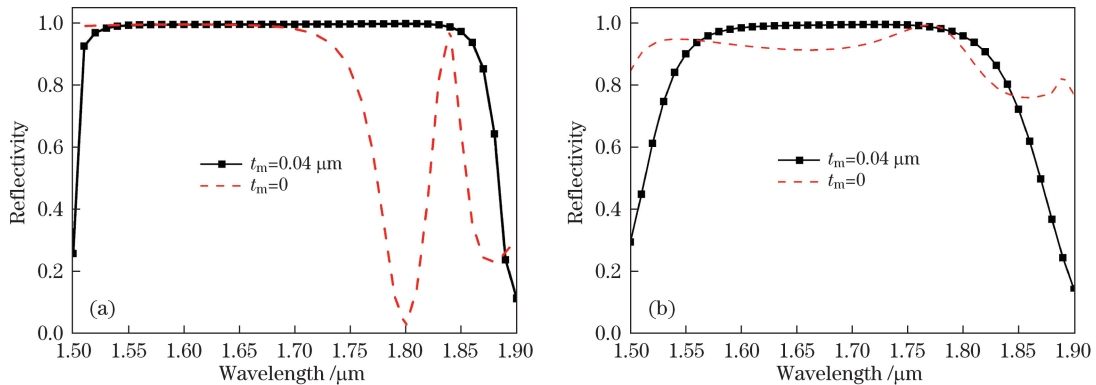


图 4 (a)TE 和(b)TM 偏振光入射时有无中间层器件的反射谱

Fig. 4 Reflectance spectra of the reflector with and without middle layer for (a) TE and (b) TM polarization light incidence

此外,还考察了该器件在中心波长 ($1.68 \mu\text{m}$) 处的角度响应谱,如图 5 所示。对于 TE 偏振光,如图 5(a)所示,理论曲线表明,在 $-16^\circ \sim 16^\circ$ 范围内,此结构的反射率大于 0.99,而实验曲线表明,在 $-13.8^\circ \sim 14^\circ$ 范围内,其反射率大于 0.97;对于 TM 偏振光,如图 5(b)所示,理论曲线表明,在 $-14.8^\circ \sim 14.8^\circ$ 范围内,此器件的反射率大于 0.99,而实验曲线表明,在 $-12.2^\circ \sim 12.4^\circ$ 范围内,其反射率大于 0.97。由图 5 的理论和实验曲线可以清楚地看出,二者结果比较吻合,从而验证了理论设计的合理性。该器件的大角度带宽也源于泄漏模谐振的共存及相互作用^[21]。由于材料的高折射率差、顶层光栅形状的调制以及高折射率中间层的作用,泄漏模谐振的共存及相互作用使得此偏振无关反射镜在中心波长 ($1.68 \mu\text{m}$) 处较宽的角度范围内显示出很高的反射率。

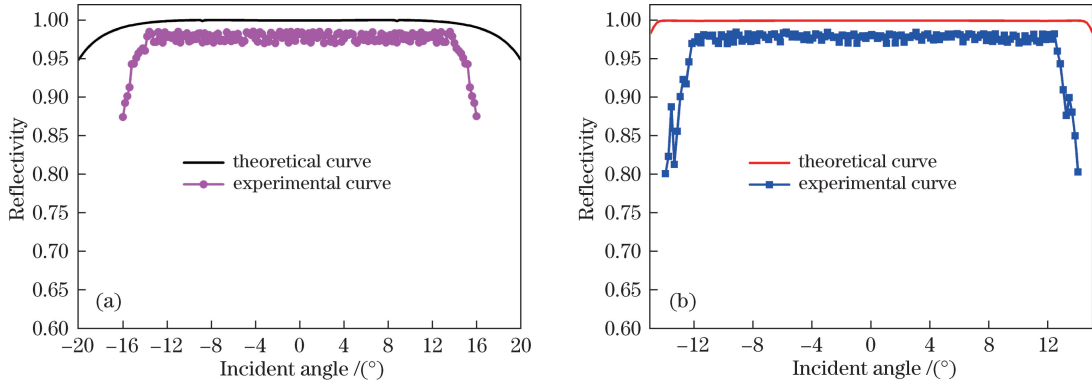


图 5 器件在 $1.68 \mu\text{m}$ 处的(a)TE 和(b)TM 偏振光角度响应谱

Fig. 5 Angular response spectra of the reflector for (a) TE and (b) TM polarization light at the wavelength of $1.68 \mu\text{m}$

在许多光学系统中,常用插入损耗(L)和偏振相关损耗(L')来表征器件的性能。为遵从此约定,定义此结构的插入损耗为

$$L_X = -10\lg R_X, \quad (2)$$

式中 R 为反射率,下标 X 为 TE 偏振光或 TM 偏振光。

定义偏振相关损耗为两个正交偏振态插入损耗之差的绝对值^[22]:

$$L' = |L_{\text{TM}} - L_{\text{TE}}|. \quad (3)$$

图 6 所示为器件的理论和实验插入损耗及偏振相关损耗随波长的变化曲线。理论曲线表明,在所关注的波长范围内($1.62 \sim 1.76 \mu\text{m}$),插入损耗小于 0.04 dB ,偏振相关损耗小于 0.02 dB 。实验曲线表明,相应的插入损耗和偏振相关损耗分别小于 0.25 dB 和 0.18 dB 。可见,理论与实验结果比较吻合。图 6 从另一个角度再次说明了此器件具有较低的插入损耗及偏振相关损耗。

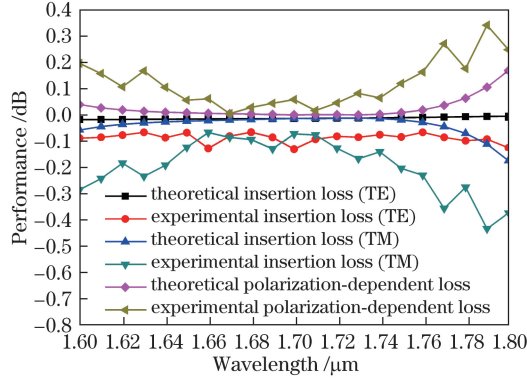


图 6 器件的插入损耗曲线及偏振相关损耗曲线

Fig. 6 Insertion loss and polarization dependent loss curves of the reflector

3 数值验证

本节将通过严格耦合波算法对此光栅反射镜的工艺容差性进行数值验证。具体来说,就是将理论优化结果、实验测试结果以及 SEM 测试结果(即根据 SEM 测出的光栅各参数值,然后再由严格耦合波算法计算出反射谱)进行比较,以分析各个参数的改变对器件性能的影响。

图 7 所示为 TE 和 TM 偏振状态下三种结果的对比。其中,理论曲线表示的是根据优化结果得到的理论数据,实验曲线表示的是实验测试得到的结果,而 SEM 测试曲线表示的是根据 SEM 测试得到的光栅周期、各个跳变点、光栅厚度、中间层厚度以及缓冲层厚度数据,然后再用严格耦合波分析法得到的结果。SEM 测试结果的平均值为: $x_1 = 0.362 \mu\text{m}$, $x_2 = 0.505 \mu\text{m}$, $x_3 = 0.590 \mu\text{m}$, $x_4 = 0.784 \mu\text{m}$, $x_5 = 0.879 \mu\text{m}$, $\Lambda = 1.02 \mu\text{m}$, $t_g = 0.653 \mu\text{m}$, $t_m = 0.031 \mu\text{m}$, $t_b = 0.98 \mu\text{m}$ 。由图 7 可知,这三条曲线吻合得比较好,表明此

结构具有较好的工艺容差性。这三条曲线的偏差主要是由光栅表面的吸收与反射以及材料折射率误差造成的,在计算过程中并未考虑这些因素。

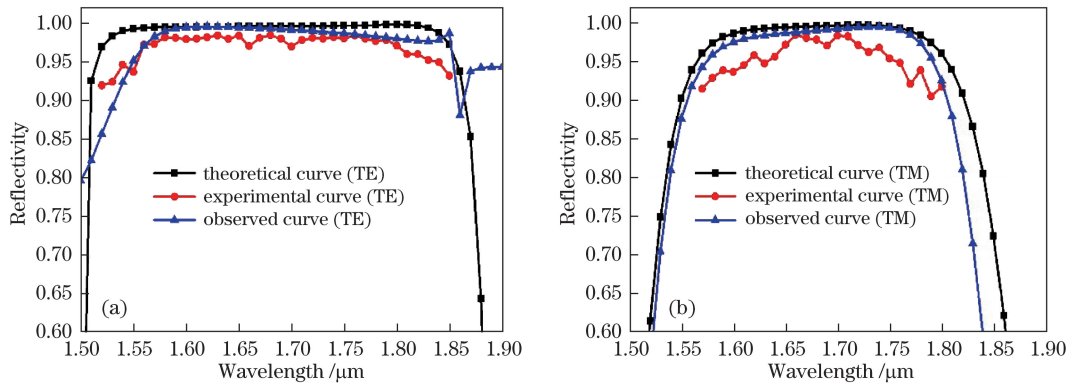


图 7 (a) TE 和 (b) TM 偏振状态下反射率的理论曲线、实验曲线及 SEM 测试曲线

Fig. 7 Theoretical, experimental and SEM observed reflectivity curves for (a) TE and (b) TM polarization light

综上所述可知,此结构表现出了比较好的工艺容差性。当光栅周期、厚度、调制形状、中间层及缓冲层厚度在工艺误差范围内变化时,在较宽的波段范围内,它们对器件反射谱的影响很小,这对器件的制作是非常有利的^[23]。

4 结 论

主要研究了一种基于多层多齿光栅结构的高性能偏振无关宽带光栅反射镜。理论和实验分析表明,此结构在比较宽的频谱范围内能对 TE 和 TM 偏振光实现较高的反射率及大角度带宽。通过严格耦合波分析算法对此结构的误差容限进行了数值验证,分析表明此器件在现有工艺误差范围内表现出了较好的工艺容差性,这对器件的制作非常有利。该偏振无关光栅反射镜可以广泛应用于可调谐器件、激光器及光通信系统中。

参 考 文 献

- [1] Ma Linfei, Xiao Wenbo, Wu Huaming, *et al.* A dual-function polarization-selective beam splitter based on a subwavelength multi-subpart profile grating structure[J]. *Applied Physics*, 2016, 6(9): 193-203.
马林飞, 肖文波, 吴华明, 等. 基于亚波长多齿光栅结构的双功能偏振选择分束器的研究[J]. *应用物理*, 2016, 6(9): 193-203.
- [2] Wang Zhiwen, Chu Jinkui, Wang Qianyi. Transmission analysis of single layer sub-wavelength metal gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0705002.
王志文, 褚金奎, 王倩怡. 单层亚波长金属光栅偏振器透射机理研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0705002.
- [3] Popov E, Hoose J, Frankel B, *et al.* Low polarization dependent diffraction grating for wavelength demultiplexing[J]. *Optics Express*, 2004, 12(2): 269-275.
- [4] Shokooh-Saremi M, Magnusson R. New nonpolarizing resonant beam splitters[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(4): 670-676.
- [5] Magnusson R, Shokooh-Saremi M, Johnson E G. Guided-mode resonant wave plates[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2472-2474.
- [6] Peters D W, Boye R R, Wendt J R, *et al.* Demonstration of polarization-independent resonant subwavelength grating filter arrays[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3201-3203.
- [7] Chen X, Tsang H K. Polarization-independent grating couplers for silicon-on-insulator nanophotonic[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 796-798.
- [8] Shao S Q, Wang Y. Highly compact polarization-independent grating coupler[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1834-1836.
- [9] Wu D, Sui Xin, Yang J, *et al.* Binary blazed grating-based polarization-independent filter on silicon on insulator[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2011, 5(1): 78-81.

- [10] Zhang R, Wang Y F, Zheng W H, *et al.* Broadband and polarization-insensitive subwavelength grating reflector for the near-infrared region[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(2): 020502.
- [11] Liu L, Deng Q, Zhou Z. Subwavelength-grating-assisted broadband polarization-independent directional coupler[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1648-1651.
- [12] Momeni B, Yegnanarayanan S, Soltani M, *et al.* Silicon nanophotonic devices for integrated sensing[J]. Journal of Nanophotonics, 2009, 3(1): 031001.
- [13] Bogaerts W, Baets R, Dumon P, *et al.* Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 401-412.
- [14] Wu H, Huang L, Xiao Y, *et al.* A wideband reflector realized by a subwavelength multi-subpart profile grating structure[J]. Journal of Optics, 2013, 15(3): 035703.
- [15] Lee W, Degertekin F L. Rigorous coupled-wave analysis for multilayered grating structures[C]. SPIE, 2003, 4987: 264-273.
- [16] Lee W, Degertekin F L. Rigorous coupled-wave analysis of multilayered grating structures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(10): 2359-2363.
- [17] Shokooh-Saremi M, Magnusson R. Particle swarm optimization and its application to the design of diffraction grating filters[J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 894-896.
- [18] Wu Huaming, Xu Huanhuan, Ma Linfei, *et al.* A high efficient reflector utilized by a subwavelength multi-subpart profile grating structure[J]. Applied Physics, 2016, 6(8): 167-174.
吴华明, 徐欢欢, 马林飞, 等. 宽带多齿谐振光栅反射镜的研究[J]. 应用物理, 2016, 6(8): 167-174.
- [19] Feng Junbo. Compact SOI grating coupler and the fabrication technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 58-88.
冯俊波. 硅基微纳光栅耦合器件及其制备技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 58-88.
- [20] Ding Y, Magnusson R. Band gaps and leaky-wave effects in resonant photonic-crystal waveguides[J]. Optics Express, 2007, 15(2): 680-694.
- [21] Shokooh-Saremi M, Magnusson R. Wideband leaky-mode resonance reflectors: influence of grating profile and sublayers[J]. Optics Express, 2008, 16(22): 18249-18263.
- [22] Wu H, Mo W, Hou J, *et al.* Polarizing beam splitter based on a subwavelength asymmetric profile grating[J]. Journal of Optics, 2010, 12(1): 015703.
- [23] Huang L, Liang D, Zeng J, *et al.* SOI-based high performance multi-subpart profile grating mirror[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 1-4.