

## 激光与光电子学进展

基于  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_2\text{O}_3$  亚波长光栅的偏振分束器设计

于传洋, 范鑫焯\*, 房文敬, 赵和宁, 毕丽平, 刘澜涛

聊城大学物理科学与信息工程学院山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252000

**摘要** 基于  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_2\text{O}_3$  亚波长光栅设计了一种高性能偏振分束器。该偏振分束器由  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  交替形成, 制备简单、结构稳定且易于集成。采用严格耦合波分析方法对光栅反射率和占空比、周期的变化关系进行了分析, 通过选取合适的光栅参数实现光栅结构对横电 (TE)、横磁 (TM) 偏振光不同的衍射特性, 进而实现了偏振分束功能。仿真和计算结果表明, 在 80 nm (800~880 nm) 宽光谱范围内, 该光栅偏振分束器对 TE 偏振光的反射率大于 94%, 对 TM 偏振光的透射率大于 90%, 且偏振消光比大于 10 dB, 最高可达 41.37 dB。此外, 还研究了光栅参数变化和入射角度偏转对偏振分束器性能的影响。结果表明, 该偏振分束器具有良好的工艺容差, 对垂直入射有左右各偏转  $4^\circ$  的容忍性, 有效解决了传统偏振分束器难以集成和制备工艺复杂的问题, 可与 GaAs 基器件集成后实现对入射光束的调控。

**关键词** 亚波长光栅; 偏振分束器; 严格耦合波分析; 偏振消光比

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1305001

## Design of Polarization Beam Splitter Based on $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_2\text{O}_3$ Subwavelength Grating

Yu Chuanyang, Fan Xinye\*, Fang Wenjing, Zhao Hening, Bi Liping, Liu Lantao

Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, Shandong, China

**Abstract** A high-performance polarizing beam splitter is designed based on  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_2\text{O}_3$  subwavelength grating in this paper. The polarizing beam splitter is alternately formed by using  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , the preparation is simple, and the structure is stable and easy to integrate. The relationship between the reflectivity, duty cycle and period of the grating is analyzed by the rigorous coupled wave analysis method. By selecting the appropriate grating parameters, the grating structure can achieve different diffraction characteristics of transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarized light, and the polarization beam splitting function is realized. The simulation and calculation results show that in the wide spectral range of 80 nm (800~880 nm), the reflectivity of the grating polarization beam splitter for TE polarized light is greater than 94%, the transmittance of TM polarized light is greater than 90%, and the polarization extinction ratio is greater than 10 dB, up to 41.37 dB. In addition, the effects of grating parameter variation and incident angle deflection on the performance of the polarizing beam splitter are also investigated. The results show that the polarizing beam splitter has good process tolerance and can tolerate  $4^\circ$  of left and right deflections for vertical incidence, which effectively solves the problems of difficult integration and complex fabrication of traditional polarizing beam splitters, and can be combined with GaAs-based devices. After integration, the control of the incident beam is realized.

**Key words** subwavelength gratings; polarization beam splitter; rigorous coupled wave analysis; polarization extinction ratio

## 1 引言

偏振分束器 (PBS) 是光学互联系统和光通信中不可缺少的元件<sup>[1]</sup>, 可以将入射光束分成两束正交偏振

光束<sup>[2-6]</sup>, 被广泛应用于各种工程领域, 如偏振复用光纤通信系统<sup>[7-9]</sup>、光纤传感器网络<sup>[10]</sup>、数字全息光学成像<sup>[11]</sup>、精密光学计量<sup>[12]</sup>、超快锁模光纤激光器<sup>[13-16]</sup>。

传统的 PBS 主要利用天然晶体的双折射效应或

收稿日期: 2021-06-01; 修回日期: 2021-07-10; 录用日期: 2021-08-02

基金项目: 山东省重点研发计划 (软科学项目) 重点项目 (K20LB1401)、信息光子学与光通信国家重点实验室 (北京邮电大学) 开放基金 (IPOC2019A009)

通信作者: \*fanxinye@luc.edu.cn

多层膜结构材料制作而成,存在难于集成、制备过程复杂、价格昂贵且光谱范围较窄的问题。随着微纳米加工技术的不断成熟和光栅理论不断发展,亚波长光栅(SWG)逐渐成为不可或缺的光束分离器件。SWG具有独特的光学特性,可以实现许多传统光学器件无法实现的功能,且具有体积小、衍射效率高、制备工艺简单、易于集成等优点<sup>[17]</sup>,解决了传统PBS存在的诸多问题。Wang等<sup>[18]</sup>提出了一种基于高折射率差的双层金属光栅PBS,在1220~1690 nm波长范围内,横磁(TM)和横电(TE)模式偏振光的衍射效率均可达到97%,在1310 nm和1550 nm波长处的偏振消光比( $X_{ER}$ )均可达到30 dB。Fu等<sup>[7]</sup>提出了一种V脊熔融硅光栅PBS,在800 nm波长附近,对TE模式-2级偏振光和TM模式0级偏振光的衍射效率均大于99%,在790~830 nm波段, $X_{ER}$ 达到20 dB。但存在入射角度固定和ER略低的问题,且制作过程较为复杂。

本文提出了一种基于 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_2O_3$ 的SWG宽光谱PBS,光栅结构由材料 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 与湿法氧化工艺生成的氧化间隔物 $Al_2O_3$ 相互交替构成,厚度为250 nm,周期为642 nm,占空比为0.22。该PBS可将80 nm(800~880 nm)宽光谱范围的入射光束分成TE、TM两束正交偏振光,且衍射效率均大于90%,最高可达99.99%, $X_{ER}$ 均大于10 dB,具有良好的偏振分束效果。此外,分析了光栅参数和入射角度对PBS性能的影响,证明了该结构具有较好的工艺容差,且对垂直入射有左右各偏转4°的容忍性。

## 2 设计原理

图1为周期型SWG在 $x-z$ 平面的分布图,其中, $\Lambda$ 为光栅周期, $t_g$ 为光栅厚度, $S$ 为单个光栅周期内 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 的宽度。入射光会依次经过三个区域:区域I为光入射区域,材料是折射率 $n_1=1$ 的空气;区域II为光栅区域,光栅由折射率 $n_r=3.0603$ 的 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 与折射率 $n_s=1.759$ 的 $Al_2O_3$ 相互交替构成;区域III为光透射区域,材料为空气。 $y$ 方向可以视为无限延伸的均匀介质,这种空间上不对称的构造以及亚波长尺度,决定了光栅对TE模式和TM模式偏振光的衍射性质具有很大差异,使SWG对不同模式偏振入射光表现出形式双折射效应,即偏振敏感特性<sup>[19]</sup>。

SWG具有独特的衍射特性,光栅周期小于或近似

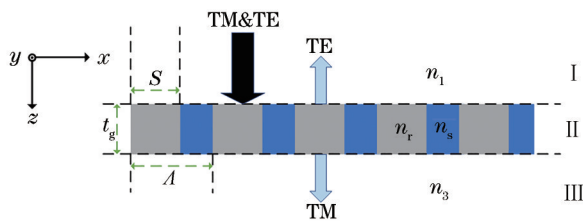


图1 周期型SWG的分布图

Fig. 1 Distribution of the periodic SWG

于入射波长<sup>[20]</sup>,可以等效为一个均匀介质波导<sup>[21]</sup>,光波入射到光栅上仅产生0级衍射波。根据SWG的偏振敏感特性,光从上方入射进光栅层中,TE模式偏振光反射回入射区域,TM模式偏振光透射进光栅另一侧,实现光栅异侧分束。采用严格耦合波分析(RCWA)方法得到TM模式偏振光各衍射级次下反射波和透射波的衍射效率<sup>[22]</sup>为

$$\begin{cases} \eta_{li} = |R_i|^2 \operatorname{Re} \left[ k_{1,zi} / (k_0 n_1 \cos \theta) \right] \\ \eta_{Ti} = |T_i|^2 \operatorname{Re} \left( \frac{k_{3,zi}}{n_3^2} \times \frac{n_1}{k_0 \cos \theta} \right) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $\theta$ 为入射角度, $k_0$ 为真空条件下入射波的波数, $R_i$ 为第*i*级衍射反射波的归一化磁场强度, $T_i$ 为第*i*级衍射透射波的归一化磁场强度, $k_{1,zi}$ 和 $k_{3,zi}$ 分别为反射区和透射区中第*i*级衍射波矢沿 $z$ 方向的分量,Re为取数值实部的函数。TE模式偏振光各衍射级次下反射波和透射波的衍射效率<sup>[22]</sup>为

$$\begin{cases} \eta_{li} = |R_i|^2 \operatorname{Re} \left[ k_{1,zi} / (k_0 n_1 \cos \theta) \right] \\ \eta_{Ti} = |T_i|^2 \operatorname{Re} \left[ k_{3,zi} / (k_0 n_1 \cos \theta) \right] \end{cases}, \quad (2)$$

根据能量守恒定律<sup>[22]</sup>得到

$$\sum_i (\eta_{li} + \eta_{Ti}) = 1. \quad (3)$$

光栅的周期 $\Lambda$ 、占空比 $\eta$ 和厚度 $t_g$ 是影响SWG光学特性的主要参数,通过改变三个变量的数值调整入射光的场分布<sup>[17]</sup>。用RCWA方法探讨SWG在特定厚度下周期和占空比的变化与反射率的关系,通过对结构参数的不断优化,使光栅对TE模式偏振光具有高反射率、对TM模式偏振光具有高透射率,且两种模式偏振光的宽带高反射率和高透射率波长范围重合。

## 3 PBS的设计与仿真

为了便于光栅结构和其他器件的集成,该光栅结构的厚度为250 nm。实验设计的PBS对入射光有偏振分束的功能,当光束入射到光栅时,光栅对TM偏振光表现出高透射特性,对TE偏振光表现出高反射特性。利用Matlab软件和RCWA方法模拟计算光栅在特定厚度下周期和占空比的变化对TE模式和TM模式偏振光透射率的影响,以确定符合要求的周期和占空比<sup>[23-24]</sup>,仿真结果如图2所示。厚度为250 nm的光栅对TM模式偏振光的透射率分布如图2(a)所示,厚度为250 nm的光栅对TE模式偏振光的反射率分布如图2(b)所示。可以发现:光栅的周期变化范围为0.2~0.7  $\mu\text{m}$ ,占空比的变化范围为0.2~0.8。在选取光栅参数时,需使TM模式的偏振光具有高透射率,即在图2(a)中的深色区域选择光栅参数;TE模式的偏振光具有高反射率,即在图2(b)中的深色区域选择光栅参数。最终选取的光栅周期为642 nm,占空比为0.22。

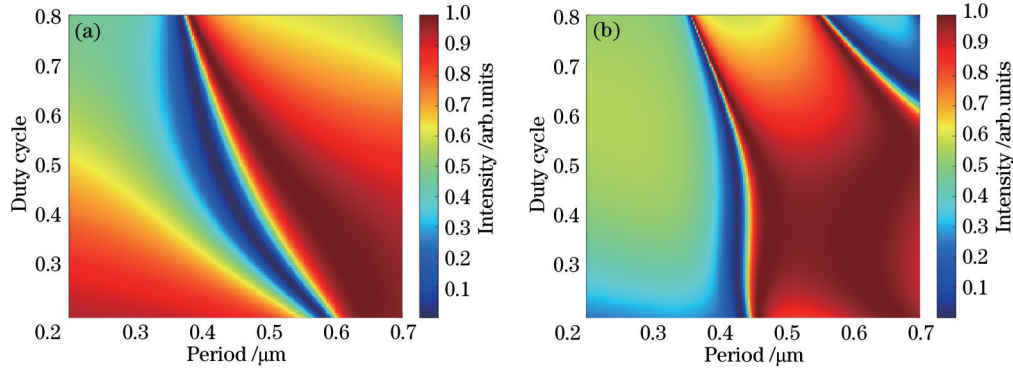


图 2 透射(反射)率、周期和占空比之间的关系。(a) TM 偏振光;(b) TE 偏振光

Fig. 2 Diagram of the relationship between the transmittance (reflection) rate, period, and duty cycle. (a) TM polarized light; (b) TE polarized light

图 3 为该 PBS 对 TE 模式偏振光和 TM 模式偏振光反射率随波长变化的光谱特性曲线。可以发现,在 80 nm(800~880 nm)的宽光谱范围内,该 PBS 表现出良好的偏振分束特性。其中,TE 模式偏振光的反射率大于 94%,最大可达到 99.99%;TM 模式偏振光的透射率大于 90%,最大可达到 99.94%。

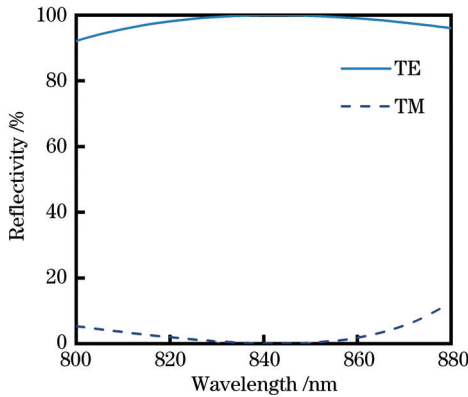


图 3 PBS 的反射光谱

Fig. 3 Reflectance spectrum of the PBS

偏振消光比是 PBS 重要的性能参数<sup>[25]</sup>,可表示为

$$X_{ER} = \min[X_{ER(TM)}, X_{ER(TE)}], \quad (4)$$

$$\begin{cases} X_{ER(TM)} = 10 \log \frac{T_{TE(TM)}}{T_{TM(TM)}} \\ X_{ER(TE)} = 10 \log \frac{T_{TE(TE)}}{T_{TM(TE)}} \end{cases}, \quad (5)$$

式中,  $T_{TM(TM)}$  和  $T_{TE(TM)}$  分别为 TM 模式偏振光输出口 TM 和 TE 模式偏振光的透射率,  $T_{TE(TE)}$  和  $T_{TM(TE)}$  分别为 TE 模式偏振光输出口 TE 和 TM 模式偏振光的透射率。图 4 为 PBS 的  $X_{ER}$  随入射波长的变化曲线。可以发现:该 PBS 的 TE 模式偏振光和 TM 模式偏振光的消光比均大于 10 dB, TM 模式偏振光的消光比在 850 nm 波长处达到峰值,为 54.55 dB; TE 模式偏振光的消光比在 849 nm 波长处达到峰值,为 52.66 dB,且在 830~860 nm 波长范围内,该 PBS 的消光比均大

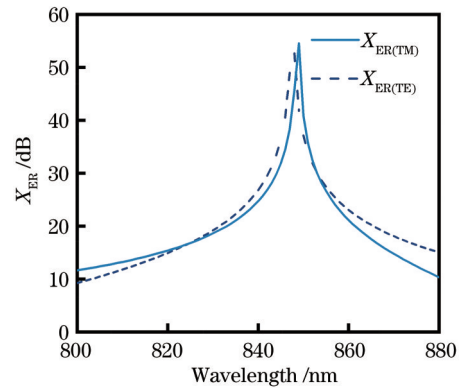


图 4  $X_{ER}$  随入射波长的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of  $X_{ER}$  with incident wavelength

于 20 dB,在 850 nm 波长处达到峰值,为 41.37 dB。

为了验证 PBS 对不同模式偏振光的分束功能,通过有限元法(FEM)和 COMSOL 仿真软件对不同模式偏振光经过 PBS 后的电场分布进行建模仿真,仿真区域如图 5 所示。其中,波长为 850 nm 的光从底部入射,完美匹配层(PML)将仿真区域包围,可完全吸收所有入射波。此外,散射边界(SBC)可避免反射干扰。

当入射光的波长为 850 nm 时,仿真得到不同偏振

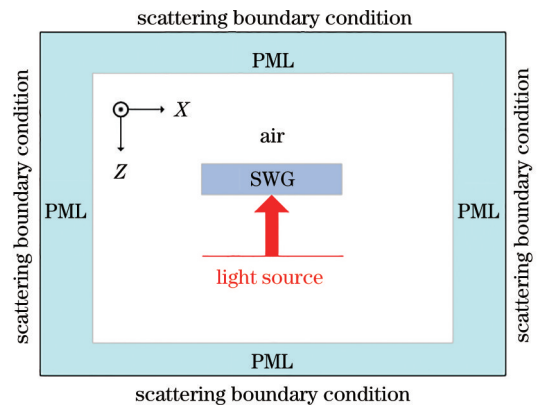


图 5 仿真区域的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the simulation area



态光束经过 PBS 的电场强度分布如图 6 所示。其中, 箭头方向为入射光方向。图 6(a) 为 PBS 对 TM 模式偏振光高透特性的电场分布, 图 6(b) 为 PBS 对 TE 模式偏振光高反特性的电场分布。计算得到, 该 PBS 对

TE 模式偏振光的反射率为 99.3%, 对 TM 模式偏振光的透射率为 98.9%, 偏振消光比可达 19.55 dB, 验证了该 PBS 良好的偏振分束功能。

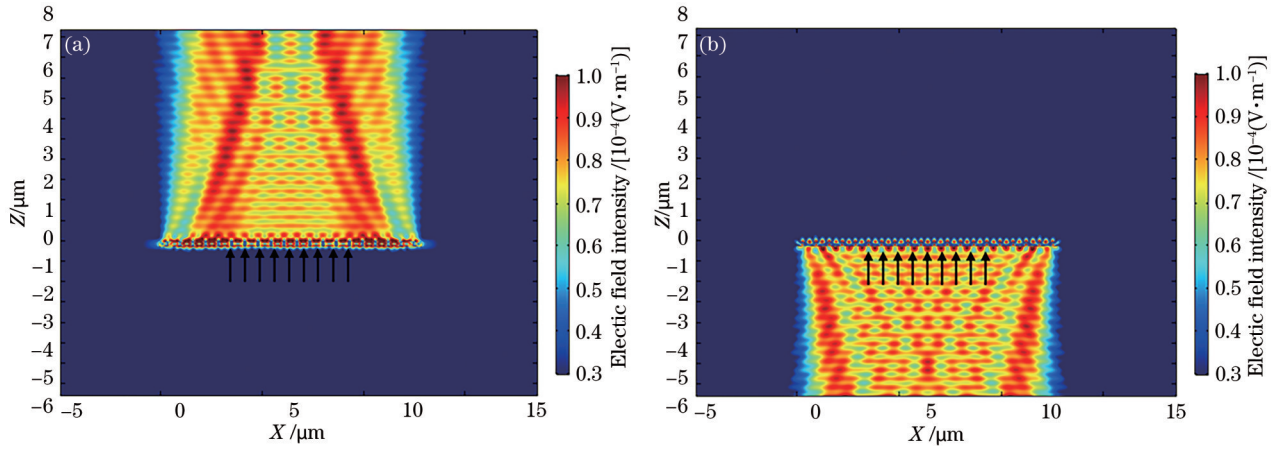


图 6 电场分布图。(a) TM 偏振光; (b) TE 偏振光

Fig. 6 Electric field distribution diagram. (a) TM polarized light; (b) TE polarized light

#### 4 参数分析

不同入射角度下的 PBS 衍射效率是衡量器件性能的一个重要标准, 因此, 需要探究入射角度对 PBS 性能的影响。设置垂直入射为  $0^\circ$ , 依次仿真计算出右偏  $0^\circ \sim 5^\circ$  时 PBS 的反射率光谱图和  $X_{ER}$  曲线, 结果如图 7 所示。可以发现, TE 模式偏振光的反射率基本

不变, TM 模式偏振光的反射率受入射角度的影响较大, 但偏转角度在  $4^\circ$  以内时, 反射率光谱基本一致。入射光束偏转  $3^\circ$  以内时, PBS 的  $X_{ER}$  基本一致, 偏转角度为  $4^\circ$  时,  $X_{ER}$  有明显减小, 但仍可以达到 10 dB。由于该 SWG 为周期型, 光束左偏和右偏的结果是相同的, 表明该 PBS 对垂直入射有左右各偏转为  $4^\circ$  的容忍性。

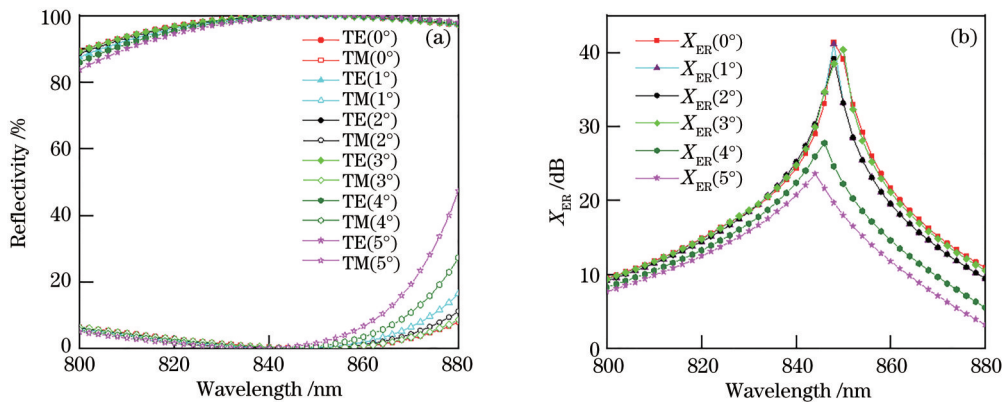


图 7 入射角对 PBS 性能的影响。(a) 反射率; (b) 偏振消光比

Fig. 7 Effect of the incident angle on the performance of PBS. (a) Reflectivity; (b) polarization extinction ratio

为了探究该 PBS 的工艺容差, 仿真了光栅厚度、周期和占空比对 PBS 器件性能的影响, 结果如图 8、图 9 所示。在  $800 \sim 880$  nm 波长范围内, 选取厚度分别为 240、250、260 nm, 周期分别为 632、642、652 nm, 占空比分别为 0.20、0.22 和 0.24 的三组结构参数, 并用 Matlab 软件和 RCWA 方法计算 PBS 的反射率和  $X_{ER}$ 。从图 8(a) 和图 9(a) 可以发现, 光栅厚度变化时 PBS 的反射率曲线大致重合, 表明厚度在 20 nm 内变化时对 PBS 衍射效率的影响不大<sup>[26]</sup>, 而光栅厚度变化时, PBS

的  $X_{ER}$  变化曲线偏移比较明显, 但在宽光谱内仍保持着优良的分束性能。从图 8(b) 和图 9(b) 可以发现, 在  $800 \sim 880$  nm 波长范围时, 周期变化会使反射光谱产生移动, 光栅周期增大时, PBS 的反射光谱向长波方向偏移; 光栅周期减小时, PBS 的反射光谱向短波方向偏移<sup>[27]</sup>。从图 8(c) 和图 9(c) 可以发现, 三组占空比情况下的 PBS 均具有极高的衍射效率,  $X_{ER}$  总体均大于 10 dB。综上所述, 该 PBS 具有良好的工艺容差。

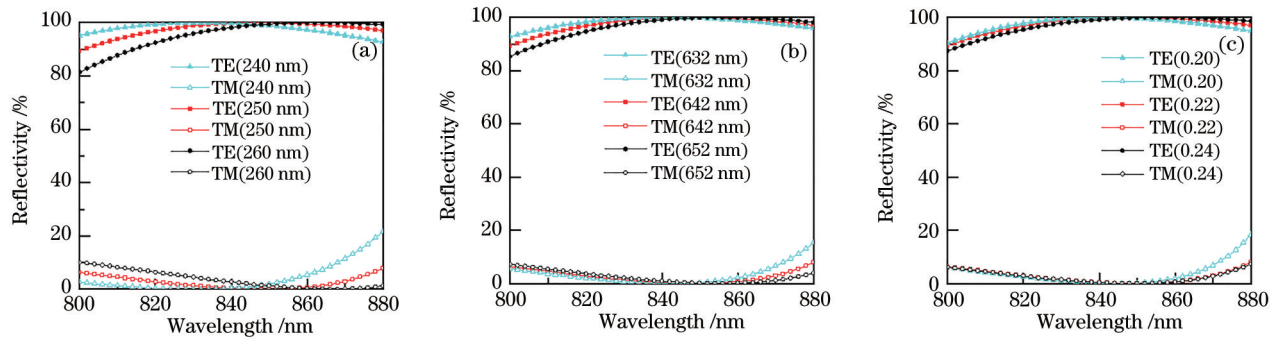
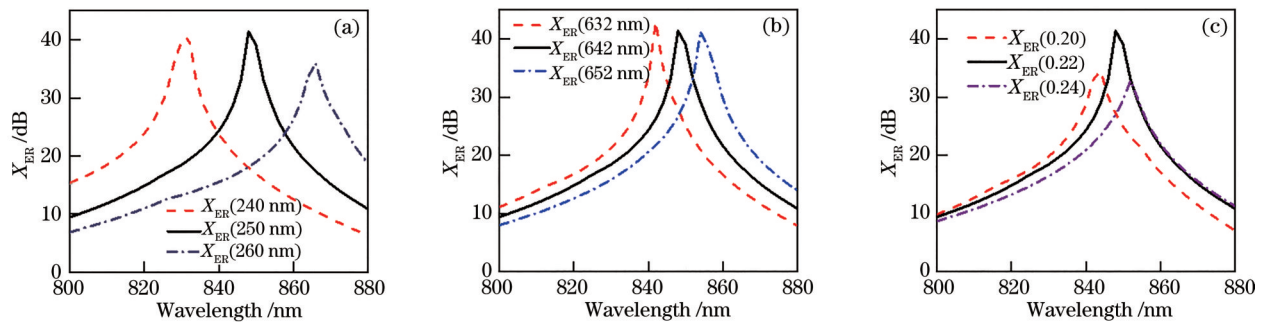


图 8 光栅结构参数对反射光谱的影响。(a)厚度;(b)周期;(c)占空比

Fig. 8 Influence of grating structure parameters on reflection spectrum. (a) Thickness; (b) period; (c) duty cycle

图 9 光栅结构参数对  $X_{ER}$  的影响。(a)厚度;(b)周期;(c)占空比Fig. 9 Influence of grating structure parameters on  $X_{ER}$ . (a) Thickness; (b) period; (c) duty cycle

## 5 结 论

提出了一种基于  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_2O_3$  的 SWG 宽光谱 PBS, 可由外延生长、曝光显影、湿法氧化等工艺加工制成。仿真结果表明, 在 80 nm (800~880 nm) 的宽光谱范围内, 该 PBS 对 TE 模式偏振光的反射率大于 94%, 最大可达到 99.99%。对 TM 模式偏振光的透射率大于 90%, 最大可到达 99.94%, 偏振消光比大于 10 dB, 在 830~860 nm 光谱范围可以达到 20 dB 以上, 最高可达 41.37 dB, 且该 PBS 对入射光束的准直性具有极好的容忍度。此外, 还探讨了器件参数变化对反射光谱和  $X_{ER}$  的影响, 结果表明, SWG 的工艺容差在 20 nm 以内, 对 PBS 的衍射效率影响较小, 可保持较大的  $X_{ER}$ , 且设计的 PBS 易与 GaAs 基光电器件集成, 实现良好的偏振分束效果, 可广泛应用于光通信系统中。

## 参 考 文 献

- [1] Liu D, Citrin D S, Hu S. Compact high-performance polarization beam splitter based on a silicon photonic crystal heterojunction[J]. *Optical Materials*, 2020, 109: 110256.
- [2] Qin L, Yang J T, Wang C G, et al. Preparation and measurement of subwavelength bilayer metal wire grid polarizers on flexible plastic substrates[J]. *Optics Communications*, 2019, 434: 118-123.
- [3] Bai B, Pei L, Zheng J J, et al. Compact and high extinction ratio TM-pass polarizer utilizing hollow hybrid plasmonic waveguide[J]. *Optics Communications*, 2019, 445: 182-186.
- [4] Song Y P, Xu P P. Design of ultra-low insertion loss active transverse electric-pass polarizer based  $Ge_2Sb_2Te_3$  on silicon waveguide[J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 30-34.
- [5] Tian F J, Liu G Y, Luo J F, et al. A modified dual-core THz fiber polarization splitter with four subwavelength tubes[J]. *Optik*, 2021, 225: 165862.
- [6] 黄诚, 白成林, 房文敬, 等. 光束会聚型亚波长光栅  $1 \times 4$  功率分束器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 030502.
- [7] Huang C, Bai C L, Fang W J, et al. Sub-wavelength grating  $1 \times 4$  power splitter with beam convergence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 030502.
- [8] Fu C, Wang B. Arrays of V-ridge for polarization selection with efficiency more than 99%[J]. *Optik*, 2020, 220: 165188.
- [9] Tan Y, Wu H, Dai D X. Silicon-based hybrid (de) multiplexer for wavelength-/polarization-division-multiplexing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(11): 2051-2058.
- [10] Dai D X. Silicon nanophotonic integrated devices for on-chip multiplexing and switching[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(4): 572-587.
- [11] Song Q H, Peng H K, Zhou S F, et al. A novel weak-scattering Michelson interferometer based on PBS for long-distance disturbance localization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(6): 1543-1549.
- [12] Das B, Yelleswarapu C S, Rao D V G L N. Parallel-

- quadrature phase-shifting digital holographic microscopy using polarization beam splitter[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 4954-4960.
- [12] Azzam R M A, De A. Optimal beam splitters for the division-of-amplitude photopolarimeter[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20(5): 955-958.
- [13] Hui Z, Xu W, Li X, et al. Cu<sub>2</sub>S nanosheets for ultrashort pulse generation in the near-infrared region[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(13): 6045-6051.
- [14] Hui Z Q, Qu M J, Li X H, et al. SnS nanosheets for harmonic pulses generation in near infrared region[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(48): 485706.
- [15] Seddon A B, Tang Z Q, Furniss D, et al. Progress in rare-earth-doped mid-infrared fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26704-26719.
- [16] Aydın Y O, Fortin V, Maes F, et al. Diode-pumped mid-infrared fiber laser with 50% slope efficiency[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 235-238.
- [17] 黄诚, 白成林, 房文敬, 等. 基于反射会聚的亚波长光栅多路功分器[J]. *光电子·激光*, 2019, 30(12): 1252-1256.
- Huang C, Bai C L, Fang W J, et al. Subwavelength grating multi-channel power divider based on reflection convergence[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2019, 30(12): 1252-1256.
- [18] Wang Q, Cao S H, Du Y H, et al. Broadband polarizing beam splitter based on two-layer metal grating with a high refractive index dielectric layer[J]. *Optik*, 2017, 140: 268-272.
- [19] 王莹. 光通信中的亚波长光栅及分束器件的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 35-22.
- Wang Y. Research on sub-wavelength grating and grating based beam splitters in optical communication systems [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017: 35-22.
- [20] 张锦龙, 史帅凯, 焦宏飞, 等. 层叠亚波长光栅中的模式匹配分析法[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1205001.
- Zhang J L, Shi S K, Jiao H F, et al. Analytical mode matching in stacked subwavelength gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1205001.
- [21] 赵然, 孙崇磊, 徐晓, 等. 基于亚波长光栅的高集成度垂直光耦合器[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1405002.
- Zhao R, Sun C L, Xu X, et al. Ultra-compact vertical optical coupler based on subwavelength grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1405002.
- [22] 汤厚睿. 氧化锌亚波长光栅偏振分束器的设计与分析[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019: 13-17.
- Tang H R. Design and analysis of ZnO-based sub-wavelength grating polarizing beam splitter[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019: 13-17.
- [23] 武华, 彭莉, 袁寿财, 等. 基于亚波长高对比度光栅的波前调控器设计[J]. *光子学报*, 2017, 46(10): 1023005.
- Wu H, Peng L, Yuan S C, et al. Design of wavefront controller based on subwavelength high-contrast grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(10): 1023005.
- [24] 杨晓伟, 王明红, 范鑫焯, 等. 基于新型非周期高对比度亚波长光栅光电探测器[J]. *光电子·激光*, 2020, 31(7): 701-707.
- Yang X W, Wang M H, Fan X Y, et al. Based on a new type of non-periodic high-contrast sub-wavelength grating photodetector[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2020, 31(7): 701-707.
- [25] 房文敬. 光通信系统中新型亚波长光栅与半导体光探测器集成的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 86-89.
- Fang W J. Research on integration of novel subwavelength grating and semiconductor photodetector for optical communication system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017: 86-89.
- [26] 曹召良, 卢振武, 李凤有, 等. 亚波长介质光栅的制作误差分析[J]. *光子学报*, 2004, 33(1): 76-80.
- Cao Z L, Lu Z W, Li F Y, et al. Analysis of fabrication error of subwavelength dielectric gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(1): 76-80.
- [27] Zheng G G, Chen Y L, Xu L H, et al. High reflectivity broadband infrared mirrors with all dielectric subwavelength gratings[J]. *Optics Communications*, 2014, 318: 57-60.