

A Polarizing Beam Splitter Based on Micro-Nano Multi-Subparts Resonant Grating

Huaming Wu^{1,2*}, Wenbo Xiao^{1,2}, Xianshuang Liu^{1,2}, Yongsheng Xiao³, Lizhen Huang³, Linfei Ma^{1,2}, Yuexia Ding^{1,2}, Jing Zeng^{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

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

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

Email: *Cookey106@126.com

Received: Nov. 28th, 2016; accepted: Dec. 13th, 2016; published: Dec. 16th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Due to the different diffraction properties of gratings for TE and TM polarized wave, in this study, using the silicon based micro-nano multi-subparts resonant grating, we propose a high performance polarizing beam splitter (PBS). The properties of the grating PBS are investigated by rigorous coupled-wave analysis. It is shown that, over a broadband spectrum of 1.53 ~ 1.62 μm (C + L band), the grating PBS demonstrates high diffraction efficiency (>97%) with extinction ratio (ER) greater than 16 dB and a comparatively wide angular bandwidth (about 8°). Effects of deviation from the design parameters on the performance of the grating PBS are also presented.

Keywords

Diffraction and Gratings, Polarizing Beam Splitters (PBSs), Leaky-Mode Resonance (LMR)

微纳多齿谐振光栅偏振分束器的研究

吴华明^{1,2*}, 肖文波^{1,2}, 刘宪爽^{1,2}, 肖永生³, 黄丽贞³, 马林飞^{1,2}, 丁月霞^{1,2}, 曾静^{1,2}

*通讯作者。

文章引用: 吴华明, 肖文波, 刘宪爽, 肖永生, 黄丽贞, 马林飞, 丁月霞, 曾静. 微纳多齿谐振光栅偏振分束器的研究[J]. 应用物理, 2016, 6(12): 273-280. <http://dx.doi.org/10.12677/app.2016.612034>

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

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

³南昌航空大学信息工程学院, 江西 南昌

Email: *Cookey106@126.com

收稿日期: 2016年11月28日; 录用日期: 2016年12月13日; 发布日期: 2016年12月16日

摘要

由于光栅对于TE和TM偏振光表现出不同的衍射性质, 据此, 基于硅基微纳多齿谐振光栅, 我们设计了一种高性能的偏振分束器。严格耦合波理论分析方法表明, 在C + L (1.53~1.62 μm)宽谱范围内, 此器件拥有衍射效率大于97%, 消光比大于16 dB, 以及角度带宽为8°等的优越性能。此外, 我们还考察了结构参数变化对此光栅偏振分束器性能的影响。

关键词

衍射光栅, 偏振分束器, 泄露模谐振

1. 引言

偏振分束器(polarizing beam splitter, PBS)是一种能将非偏振光分解成两束正交偏振光的功能元件[1], 它在磁光数据储存[2], 光通信[3], 光路由以及成像[4]等系统中有重要应用价值。近年来, 随着微细加工技术及微纳集成光学的发展, 目前集成光学器件已经开始大规模在光学系统中使用了, 这反过来又要求光学元器件朝着尺寸小, 能耗低, 易于集成方向发展。而传统的偏振分束器(如 Wollaston 棱镜, Nicol 棱镜, Glan-Thomson 棱镜等)大多体积大、厚重且难与集成光路兼容; 而以多层介质膜为基础的偏振分束器需要很多层的介质膜才能获得较高的消光比, 而且需要特定的输入角度, 其角度带宽小, 光谱范围窄[5]。

另一方面, 随着微纳加工技术的成熟和光栅理论不断发展, 以及光栅的衍射特性表现出强烈的偏振相关性, 因此, 研究者认为光栅, 尤其是亚波长光栅是实现偏振分束的一种重要手段。据此, 研究者先后提出了几种不同的光栅偏振分束器: 一是能同时反射 TM 偏振光和 TE 偏振光的光栅偏振分束器[6]; 二是能同时透射 TM 和 TE 偏振光的光栅偏振分束器[7]; 三是反射 TM (或 TE)、透射 TE (或 TM)偏振光的光栅偏振分束器[8]。

为了更进一步提高偏振分束器性能, 根据光栅的特点, 研究者又提出了形态各异的光栅偏振分束器。如, 2007年, 周治平教授课题组报道了一种基于双层二元闪耀光栅的偏振分束耦合器, 分析表明, 该结构上层光栅 TE 波的耦合效率为 58%, 下层 TM 波的耦合效率为 50% [9]。同年, 浙江大学何赛灵教授课题组报道了一种大角度的光栅偏振分束器[10], 此器件采用了双光栅堆叠的结构, 上下两层光栅错开半个周期, 从而达到反射 TE 光, 透射 TM 光的目的。后来, 华中科技大学的邵士茜等提出了一种基于 slot 刻槽光栅的偏振分束器, 该结构在 1530 nm~1630 nm 波长范围内, 器件的偏振消光比大于 15 dB [11]。最近, 武汉大学的郑国兴等基于类似于二维光栅的硅基纳米砖块阵列结构(silicon nanobrick arrays)报道了一种高性能的偏振分束器, 其对反射光的反射率约为 98.5%, 而对透射光的透射率约为 94.3% [12]。

由上述分析可知, 以上的光栅偏振分束器在带宽、结构简单性或制作工艺等方面存在不足, 不能完全适应现代集成光学发展要求。一直以来, 研究者希望能有一种高性能偏振分束器, 其结构简单、易于集成、消光比大、效率高及角度带宽大。然而, 目前这个问题还没得到很好的解决。鉴于此, 本文中,

我们设计了一种基于单层多齿亚波长谐振光栅的偏振分束器，基于泄露模谐振现象，此器件在较宽的波段范围内显示出衍射效率高，消光比大，相对较大的角度带宽等优越性能。

2. 器件结构设计及结果分析

如图 1 所示，为此多齿亚波长谐振光栅偏振分束器结构示意图。一束平面单色光垂直照射到此结构上，通过光栅层，TE 和 TM 光在 0 级分别被高效的反射和透射，从而实现偏振分束的目的。此多齿亚波长光栅是由如下参数定义的：光栅周期(T)，厚度(t_g)以及光栅跳变点(x_1, x_2, x_3)。本文中，我们假定光栅在 y 方向上是无限延伸的，组成光栅的介质材料是无损耗的，且材料的色散也忽略不计。我们采用严格耦合波分析方法[13] [14] [15]结合粒子群优化算法[16] [17]对此结构进行优化设计，其优化参数列在图 1 下面的题图说明中。

为了衡量光栅偏振分束器的性能指标，有如下参数需要确定[18]：光栅衍射效率，消光比，带宽以及角度带宽。对于图 1 所示的结构，为了达到偏振分束的目的，其 TE 偏振光的 0 级反射率 R_0^{TE} 和 TM 偏振光的 0 级透射率 T_0^{TM} 应该比较高。

另外，此分束器的消光比(extinction ratio, ER)定义为[19]：

$$ER = \min\left(ER_0^{TE}, ER_0^{TM}\right) \quad (1)$$

其中，

$$ER_0^{TE} = -10\log\frac{R_0^{TM}}{R_0^{TE}}, \quad ER_0^{TM} = -10\log\frac{T_0^{TE}}{T_0^{TM}} \quad (2)$$

ER_0^{TE} 和 ER_0^{TM} 分别为 0 级 TE 和 TM 波的消光比，单位为分贝(dB)。

图 2(a)所示为此光栅偏振分束器频谱特性曲线图。如图所示，在 1.53 到 1.62 μm 宽谱范围内，此器件 TE 波的反射率大于 99% ($R_0 > 99\%$)，而 TM 波的透射率大于 97% ($T_0 > 97\%$)。为了清楚的说明此器件高衍射效率及宽带特性的物理根源，我们画出了其透射率的对数坐标图形。如图 2(b)所示，在 1.51 μm 处，TE 波存在一个透射谷点，其对应着一个泄露模谐振点[20]。这表明，此器件的高反射效率及宽带特性来源于 TE 波的泄露模谐振。理论分析表明，谐振时，在光栅衍射反射谱中，其 0 级反射率几乎将近

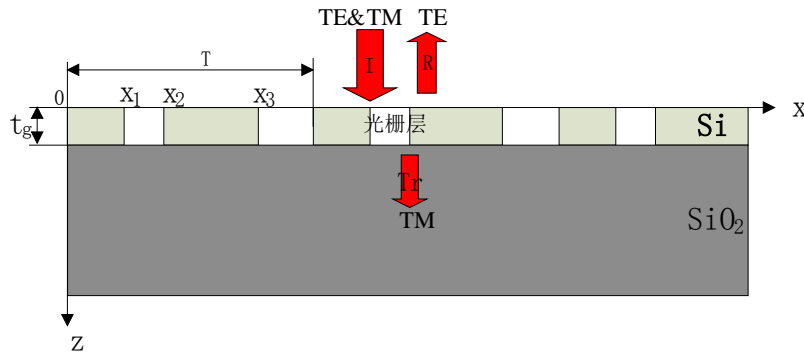


Figure 1. Schematic of a multi-subpart resonant grating PBS. T , t_g , and x_1 to x_3 denote the grating period, thickness, and transition points, respectively. The incidence medium is air, and the substrate is silica. The parameters are: $n_{\text{air}} = 1.0$, $n_{\text{Si}} = 3.48$, $n_{\text{silica}} = 1.47$, $x_1 = 0.13$, $x_2 = 0.44$, $x_3 = 0.77$, $T = 1.04 \mu\text{m}$ and $t_g = 0.9 \mu\text{m}$

图 1. 多齿谐振光栅偏振分束器结构示意图。 T , t_g , x_1 到 x_3 分别表示光栅周期，厚度以及跳变点。入射介质为空气，基底为二氧化硅。介质折射率及光栅优化参数如下： $n_{\text{air}} = 1.0$, $n_{\text{Si}} = 3.48$, $n_{\text{silica}} = 1.47$, $x_1 = 0.13$, $x_2 = 0.44$, $x_3 = 0.77$, $T = 1.04 \mu\text{m}$ 及 $t_g = 0.9 \mu\text{m}$

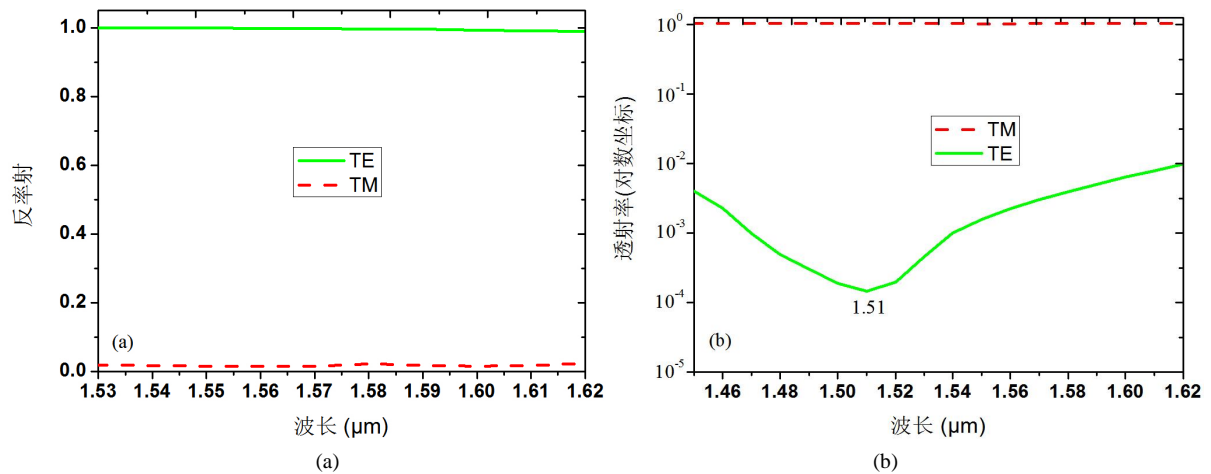


Figure 2. Spectra of a broadband PBS structure shown in Figure 1. (a) Reflectivity spectra response of the PBS. (b) Transmissivity of the PBS at log scale. The resonance wavelength is 1.51 μm

图 2. 图 1 所示宽带偏振分束器频谱特性图。(a) 偏振分束器的反射谱响应曲线。(b) 偏振分束器对数坐标透射谱响应曲线。此器件在 1.51 μm 处, TE 波发生谐振

100%, 反射波和透射波发生高效的能量交换[21]。从本质上来说, 泄漏模谐振的发生是源于入射光与光栅中的泄漏模相位相匹配[22]。另外, 由图 2(b)我们也可以看出, 此结构 TM 波的透射率接近 1, 与图 2(a)所示结果比较吻合。

此外, 此器件高反射率及宽带特性还与构成材料的高折射率差及顶层光栅调制性质有关[23] [24]。高折射率差(high-index-contrast)光栅层能够扩展谐振区域, 从而有利于高反射率、宽带特性的形成。而且, 顶层多齿光栅能够有效防止光栅偏振分束器泄漏模的快速衰减, 这能大大增加 TE 偏振光获得宽带、高反射率的可能性, 增强此器件的性能。

接下来, 我们来考察此结构的另一个性能指标——消光比。如图 3 所示, 为此光栅偏振分束器消光比随波长变化曲线。在 1.53~1.62 μm 波段范围内, 此结构 0 级 TE 光(ER_0^{TE})和 TM 光(ER_0^{TM})的消光比分别大于 16 和 20 dB。另外, 数值结果还表明, 在此波段范围内, TM 光的消光比要大于 TE 光的相应值, 这得益于 TE 波极低的透射率[如图 2(b)所示]。在谐振点, TM 光的消光比甚至大于 37 dB。图 3 也表明, 此器件能很好的工作于 1.53~1.62 μm 波段范围内, 且 TM 波的工作性能要好于 TE 波。

光栅偏振分束器衍射效率随入射角度的变化也是一个衡量器件性能的重要参考指标, 鉴于此, 我们还考察了此器件的角度响应谱。如图 4 所示, 此分束器在 $-4^\circ\sim 4^\circ$ 角度范围内, TE 和 TM 偏振光的衍射效率都大于 95%, 这相对较宽的 0 衍射级角度带宽, 使得在微光学系统中遇到的对准问题变得相对简单些。

由于时域有限差分(finite-difference time-domain method, FDTD)算法是分析和设计微纳结构强大且精确的数值算法, 为此, 我们采用了 FDTD 算法验证了此结构。在 1.57 μm 处, 假定此器件被一束平面单色光垂直照射, 经光栅分束, TE 和 TM 偏振光分别被高效的反射和透射, 如图 5 所示, 从而验证了此结构的正确性。

3. 参数分析

本小节, 我们将重点讨论此光栅偏振分束器的工艺容差性, 即考察参数变化对其性能的影响, 具体来说, 即是研究光栅周期, 厚度以及调制形状变化对此器件性能的影响。

图 6 所示为光栅周期及厚度变化对此器件性能的影响。如图 6(a)所示, 随着光栅周期的增大, 分束器反射谱将向长波长移动, 这是由于谐振位置受光栅周期影响所致[20]。

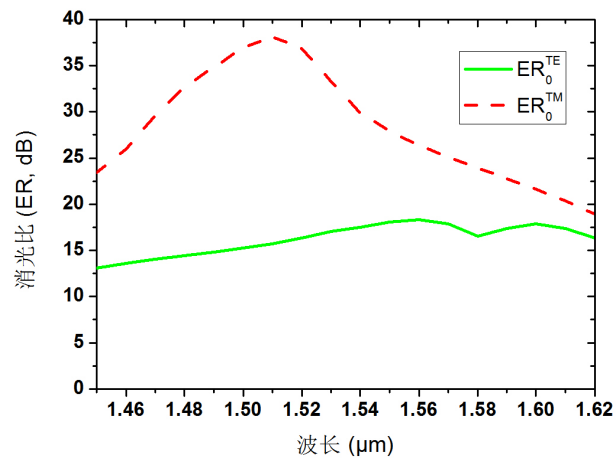


Figure 3. Extinction ratio (ER) of the grating PBS as a function of incident wavelength

图 3. 消光比随波长变化曲线

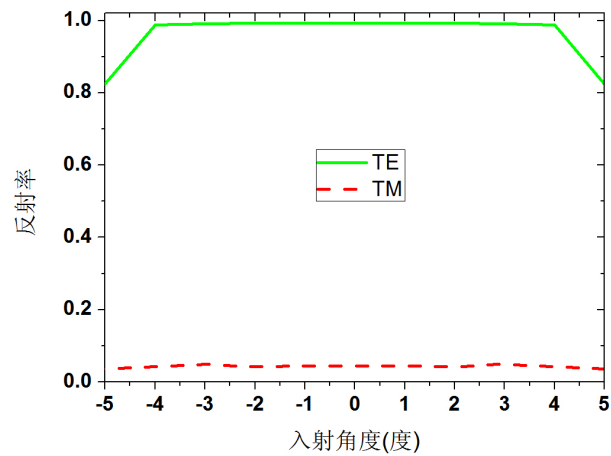


Figure 4. Angular spectrum of the grating PBS at the wavelength of $1.57 \mu\text{m}$

图 4. 在 $1.57 \mu\text{m}$ 处, 光栅偏振分束器反射率随角度变化曲线

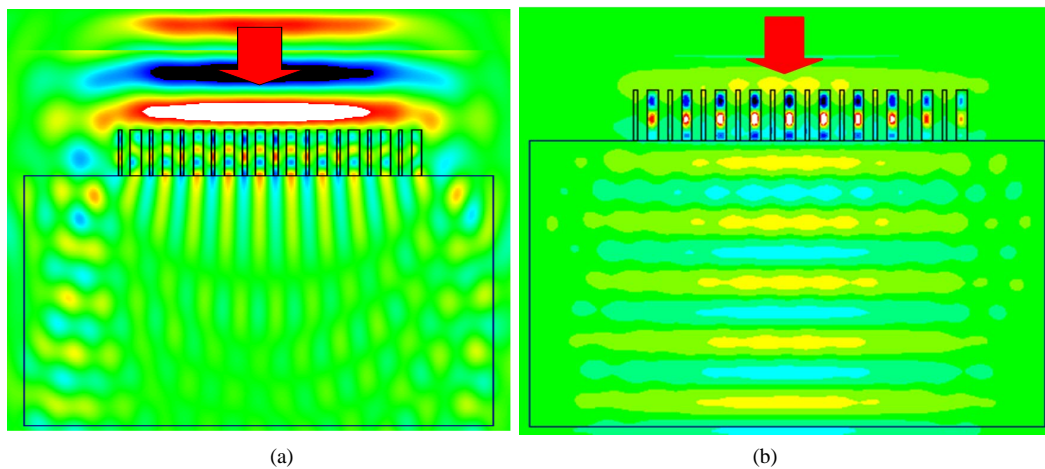


Figure 5. Simulation results at $1.57 \mu\text{m}$. (a) TE and (b) TM polarized input wave

图 5. 在 $1.57 \mu\text{m}$ 处 FDTD 模拟结果。(a) TE 和(b) TM 偏振输入光

此外，我们还考察了调制形状工艺误差对光栅偏振分束器性能的影响。如图 7 所示。调制形状参数的变化能使得此器件的性能变差。这是因为，除了光栅调制度之外，泄漏模谐振的状态还受调制形状的影响[25]。调制形状的变化能破坏泄漏模的缓慢衰减状态及谐振位置的交叠，从而使得此器件的性能变差。

4. 小结

本文中，我们重点讨论了一种高性能的微纳多齿谐振光栅偏振分束器。

理论分析表明，在 90 nm (1.53~1.62 μm)宽谱范围内，此器件表现出高的衍射效率，大的消光比以及相对较大的角度响应谱等优越性能，此性能源于构成材料的高折射率差以及多齿光栅层。

此外，我们也考察了器件参数变化对反射谱的影响。理论分析表明，光栅周期或厚度变化 20 nm 范围内，其对分束器衍射效率影响很小，这点有利于此器件的工艺制作；然而，该器件对调制形状参数变化比较敏感，这点需要在工艺制作过程中加以注意，要合理安排工艺流程，尽量减小调制形状工艺误差。

我们设计的偏振分束器只需一层简单的亚波长光栅，这使得它能在比较宽的波段范围内易于与其他

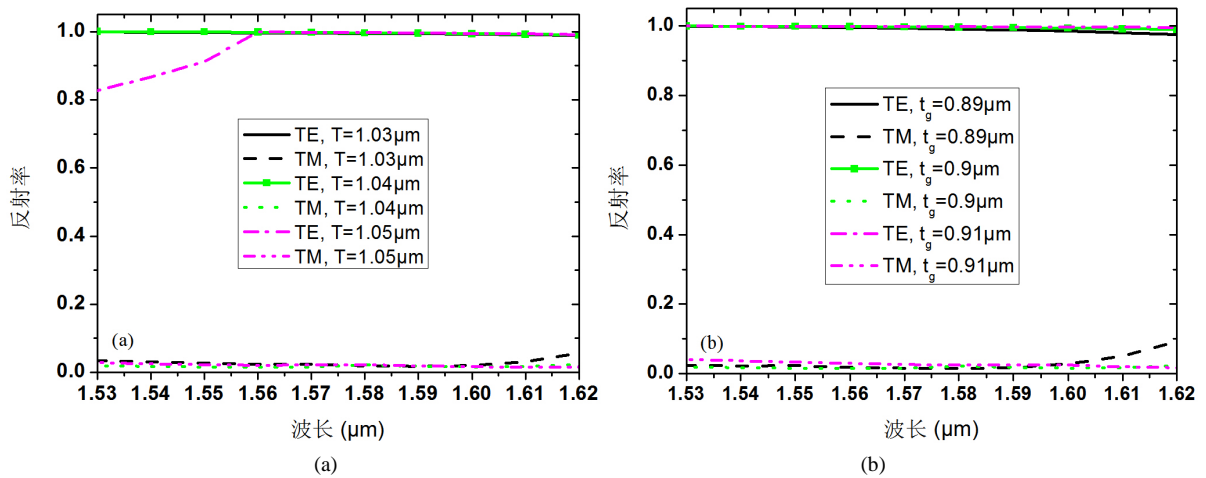


Figure 6. Spectra for the structure with variations in period and thickness. (a) Spectra for structure with variation in period. (b) Spectra for structure with variation in thickness

图 6. 光栅周期及厚度变化对器件性能的影响。(a) 光栅周期变化对反射谱的影响。(b) 光栅厚度变化对反射谱的影响

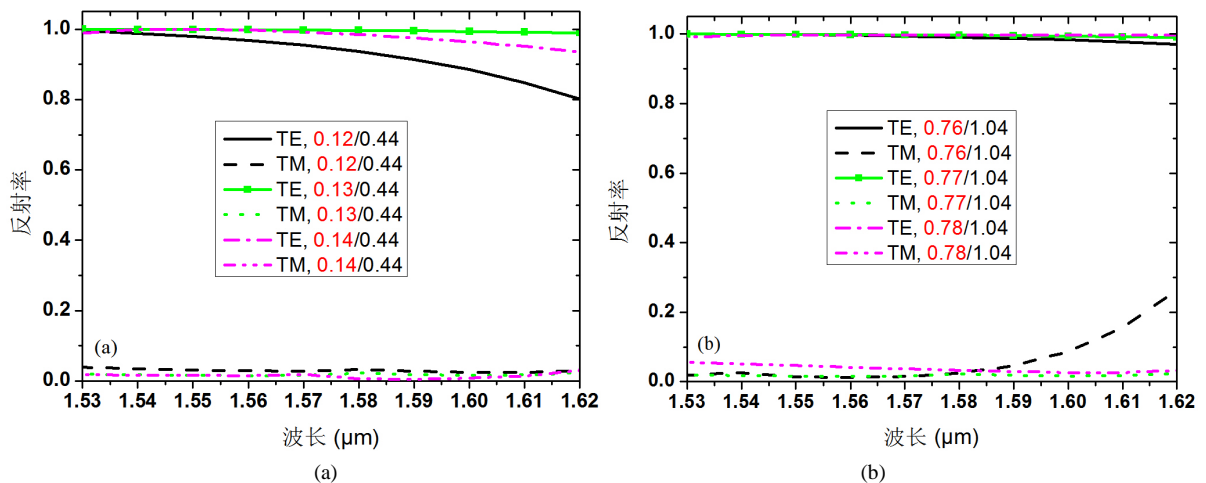


Figure 7. Spectra for the grating PBS with variation in modulation profile. Spectra for the structure with differing (a) the first high-index binary block (x_1) and (b) the second high-index binary block (x_3)

图 7. 调制形状变化对光栅偏振分束器性能影响。(a) 第一二元块(x_1)及(b) 第二二元块(x_3)尺寸变化对器件性能影响

器件集成[26]。该光栅偏振分束器可以广泛的应用于通信系统路由和开关等器件中。

致 谢

本文作者非常感谢评审专家在论文评审过程中给予的很好的建议，我们也非常感谢南昌航空大学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微纳光电器件及材料小组提供的有益帮助。

基金项目

国家自然科学基金(11264031)，江西省青年科学基金重大项目(20143ACB21011)，江西省自然科学基金(20151BAB207054, 20114BAB201019)，南昌航空大学研究生创新专项基金(YC2015042)，南昌航空大学博士启动基金(EA201008232)资助项目。

参考文献 (References)

- [1] Liang, T.K. and Tsang, H.K. (2005) Integrated Polarization Beam Splitter in High Index Contrast Silicon-on-Insulator Waveguides. *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, 393-395. <https://doi.org/10.1109/LPT.2004.839462>
- [2] Ojima, M., Saito, A., Kaku, T., *et al.* (1986) Compact Magneto-optical Disk for Coded Data Storage. *Applied Optics*, **25**, 483-489. <https://doi.org/10.1364/AO.25.000483>
- [3] Zhou, L. and Liu, W. (2005) Broadband Polarizing Beam Splitter with an Embedded metal-Wire Nanograting. *Optics Letters*, **30**, 1434-1436. <https://doi.org/10.1364/OL.30.001434>
- [4] Wu, Z., Powers, P.E., Sarangan, A.M. and Zhan, Q. (2008) Optical Characterization of Wire Grid Micropolarizers Designed for Infrared Imaging Polarimetry. *Optics Letters*, **33**, 1653-1655. <https://doi.org/10.1364/OL.33.001653>
- [5] Li, L. and Dobrowolski, J.A. (2000) High-Performance Thin-Film Polarizing Beam Splitter Operating at Angles Greater than the Critical Angle. *Applied Optics*, **39**, 2754-2771. <https://doi.org/10.1364/AO.39.002754>
- [6] Zheng, J., Zhou, C., Feng, J., *et al.* (2008) Polarizing Beam Splitter of Deep-Etched Triangular-Groove Fused-Silica Gratings. *Opt. Lett.*, **33**, 1554-1556. <https://doi.org/10.1364/OL.33.001554>
- [7] Zheng, J., Zhou, C., Feng, J., *et al.* (2009) A Metal-Mirror-Based Reflecting Polarizing Beam Splitter. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, **11**, 015710-1-6. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/1/015710>
- [8] Zhang, L., Li, J., Li, C., *et al.* (2006) A Novel Nano-Grating Structure of Polarizing Splitters. *Chinese Physics Letters*, **23**, 1820-1822. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/23/7/046>
- [9] Feng, J. and Zhou, Z. (2007) Polarization Beam Splitter Using a Binary Blazed Grating Coupler. *Optics Letters*, **32**, 1662-1664. <https://doi.org/10.1364/OL.32.001662>
- [10] Zhang, Y., Jiang, Y., He, S., *et al.* (2007) A Broad-Angle Polarization Beam Splitter Based on a Simple Dielectric Periodic Structure. *Optics Express*, **12**, 14363-14368. <https://doi.org/10.1364/OE.15.014363>
- [11] 邵士茜. 硅基集成光栅耦合器及其偏振无关特性研究[M]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [12] Zheng, G., Liu, G., Kenney, M.G., *et al.* (2016) Ultracompact High-Efficiency Polarising Beam Splitter Based on Silicon Nanobrick Arrays. *Optics Express*, **24**, 6749-6757. <https://doi.org/10.1364/OE.24.006749>
- [13] Lee, W. and Degertekin, F.L. (2004) Rigorous Coupled-Wave Analysis of Multilayered Grating Structures. *Journal of Lightwave Technology*, **22**, 2359-2363. <https://doi.org/10.1109/JLT.2004.833278>
- [14] Wu, H., Huang, L., Xiao, Y., *et al.* (2013) A Wideband Reflector Realized by a Subwavelength Multi-Subpart Profile Grating Structure. *Journal of Optics*, **15**, 035703. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/15/3/035703>
- [15] 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.
- [16] Shokooh-Saremi, M. and Magnusson, R. (2007) Particle Swarm Optimization and Its Application to the Design of Diffraction Grating Filters. *Optics Letters*, **32**, 894-896. <https://doi.org/10.1364/OL.32.000894>
- [17] 吴华明, 徐欢欢, 马林飞, 肖永生, 黄丽贞, 肖文波, 段军红. 宽带多齿谐振光栅反射镜的研究[J]. 应用物理, 2016, 6(8): 167-174.
- [18] Lalanne, P., Hazart, J., Chavel, P., *et al.* (1999) A Transmission Polarizing Beam Splitter Grating. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, **1**, 215-219. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/1/2/018>
- [19] Wang, B., Zhou, C., Wang, S., *et al.* (2007) Polarizing Beam Splitter of a Deep-Etched Fused-Silica Grating. *Optics Letters*, **32**, 1299-1301. <https://doi.org/10.1364/OL.32.001299>

- [20] Shokooh-Saremi, M. and Magnusson, R. (2008) Wideband Leaky-Mode Resonance Reflectors: Influence of Grating Profile and Sublayers. *Optics Express*, **16**, 18249-18263. <https://doi.org/10.1364/OE.16.018249>
- [21] Magnusson, R. and Wang, S.S. (1992) New Principle for Optical Filters. *Applied Physics Letters*, **61**, 1022-1024. <https://doi.org/10.1063/1.107703>
- [22] Ding, Y. and Magnusson, R. (2007) Band Gaps and Leaky-Wave Effects in Resonant Photonic-Crystal Waveguides. *Optics Express*, **15**, 680-694. <https://doi.org/10.1364/OE.15.000680>
- [23] Mateus, C.F.R., Huang, M.C.Y., Chen, L., *et al.* (2004) Broad-Band Mirror (1.12 - 1.62 μm) Using a Subwavelength Grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, **16**, 1676-1678. <https://doi.org/10.1109/LPT.2004.828514>
- [24] Mateus, C.F.R., Huang, M.C.Y., Deng, Y., *et al.* (2004) Ultrabroadband Mirror Using Low-Index Cladded Subwavelength Grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, **16**, 518-520. <https://doi.org/10.1109/LPT.2003.821258>
- [25] Magnusson, R. and Shokooh-Saremi, M. (2008) Physical Basis for Wideband Resonant Reflectors. *Optics Express*, **16**, 3456-3462. <https://doi.org/10.1364/OE.16.003456>
- [26] Zhou, Z., Wu, H., Feng, J., *et al.* (2010) Silicon Nanophotonic Devices Based on Resonance Enhancement. *Journal of Nanophotonics*, **4**, 041001. <https://doi.org/10.1117/1.3527260>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org