

# 偏振无关多齿谐振光栅反射镜的参数分析

吴华明<sup>1,2</sup>, 肖文波<sup>1,2</sup>, 肖永生<sup>3</sup>, 黄丽贞<sup>3</sup>, 段军红<sup>1,2</sup>, 徐欢欢<sup>1,2</sup>, 刘宪爽<sup>1,2</sup>, 傅建平<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>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;

<sup>3</sup>南昌航空大学信息工程学院, 江西 南昌 330063

**摘要** 通过严格耦合波分析方法考察了宽带偏振无关多齿谐振光栅反射镜的工艺容差性。理论分析显示, 在 1.62~1.76  $\mu\text{m}$  波段范围内, 当微纳谐振光栅的周期和厚度、调制形状、中间层厚度及缓冲层厚度等关键结构参数变化 20 nm 时, 其对器件反射谱的影响几乎可以忽略不计。该结果表明此结构在现有工艺误差范围内表现出比较好的工艺容差性, 从而有利于该器件的加工制备。

**关键词** 集成光学; 偏振无关反射镜; 亚波长多齿光栅; 结构参数分析

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.041301

## Parameters Analysis of Polarization Independent Reflector with Multi-Subpart Profile Resonant Grating

Wu Huaming<sup>1,2</sup>, Xiao Wenbo<sup>1,2</sup>, Xiao Yongsheng<sup>3</sup>, Huang Lizhen<sup>3</sup>, Duan Junhong<sup>1,2</sup>,

Xu Huanhuan<sup>1,2</sup>, Liu Xianshuang<sup>1,2</sup>, Fu Jianping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National 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;

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

<sup>3</sup>School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

**Abstract** By using rigorous coupled-wave analysis method, the process tolerance of broadband polarization independent reflector with multi-subpart profile resonant grating is investigated. The theoretical analysis shows that, in the wavelength range of 1.62-1.76  $\mu\text{m}$ , the change of 20 nm of critical structural parameters such as period and thickness, modulation profile, middle layer thickness, buffer thickness of micro-nano resonant grating has a negligible effect on the reflectance spectrum of the device. The results show that the proposed reflector has good processing tolerance in the existing processing error range, which is conducive to the processing and fabrication of the device.

**Key words** integrated optics; polarization independent reflector; subwavelength multi-subpart profile grating; structural parameter analysis

**OCIS codes** 130.3120; 230.4040; 050.6624; 230.1950

## 1 引言

近年来,随着集成光学及微纳加工技术的不断

发展和完善,利用其结构简单、制作工艺相对简便以及易于集成等优点,微纳谐振光栅在太阳能电池<sup>[1]</sup>、激光器<sup>[2]</sup>、耦合器<sup>[3]</sup>、慢光器件<sup>[4]</sup>以及吸收器<sup>[5-6]</sup>等

收稿日期: 2017-10-05; 收到修改稿日期: 2017-10-16

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)、航空科学基金(20162856004)、无损检测技术教育部重点实验室基金(ZD201629004)、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(YC2017051)

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研究。E-mail: cookey106@126.com

实现功能丰富的大规模集成光电回路器件方面发挥着日益重要的作用。此处所谓谐振是指当外部的衍射光与光栅中的泄漏模相位相匹配时,会使得光栅衍射谱能量重新分布的一种现象,表现为在光栅衍射谱中反射光与透射光几乎 100% 能量交换的一个过程,这种现象又被称之为泄漏模(或导模)谐振<sup>[7-8]</sup>。基于微纳光栅的谐振原理,美国加州大学伯克利分校的 Chang-Hasnain 课题组<sup>[9-11]</sup>将一种高折射率差的光栅(HCGs)置于垂直腔表面激光器(VCSLSs)中,用于提高出光效率;而美国德州大学阿灵顿分校的 Magnusson 课题组<sup>[12-13]</sup>设计了宽带微纳谐振光栅反射镜;最近,长春理工大学的田锷等<sup>[14]</sup>利用 GaAs 材料,设计了一种具有波长和偏振模式选择特性的亚波长抗反射光栅;而本课题组<sup>[15]</sup>则基于微纳一维多齿谐振光栅设计优化了一种双功能的光栅偏振分束器。

然而通常情况下,光栅对入射光的偏振状态都比较敏感,这限制了光栅在解复用器、非偏振激光器以及探测器等器件中的进一步应用。为了解决这一问题,2004年,Popov等<sup>[16]</sup>提出了一种低偏振相关损耗(PDL)的硅基光栅反射器。后来,Shokoooh-Saremi 课题组<sup>[17]</sup>则基于硅材料系统,利用微纳谐振光栅设计了一种宽带偏振无关光栅分束器。2011年,Alasaarela等<sup>[18]</sup>基于单层微纳一维光栅的泄漏模谐振原理,分别设计了矩形和正弦结构的两种非偏振光栅透射滤波器。2012年,Zheng 课题组<sup>[19]</sup>报道了一种基于半导体-绝缘体-金属结构的亚波长偏振不敏感光栅反射镜;随后,该课题组<sup>[20]</sup>还设计了一种具有多层光栅结构的宽带偏振无关光栅反射镜。另外,周顾人等<sup>[21]</sup>提出了一种基于块状二维亚波长光栅的偏振不敏感宽光谱高反镜的设计方法。而最近,本课题组<sup>[22]</sup>则利用多齿光栅的独有特性,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。基于上述结构,本文主要分析此微纳谐振光栅关键结构参数的变化对器件性能影响,进一步阐明本课题组所设计的结构在保持高性能的同时,在现代微纳制备工艺误差范围内还具有好的误差性能,表现出很好的制备工艺特性。

## 2 结构与测试结果

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, $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  为跳变点坐

标, $t_g$  为光栅厚度, $t_m$  为中间层厚度, $t_b$  为缓冲层厚度, $\Lambda$  为周期; $I, R$  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  $0^\circ$  入射角(相对于光栅法线)照射到此结构上,通过此结构,TE 和 TM 偏振光在零级都能被高效地反射。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,且材料的色散也忽略不计,材料的折射率参数如下: $n_{\text{air}}=1.0, n_{\text{Si}}=3.48, n_{\text{silica}}=1.47$ 。

对于图 1 所示的结构,为了达到预期设计目标,需要对  $\Lambda, t_g, t_m$  以及各跳变点坐标参数进行优化。而对于入射角度  $\theta, t_b$  及材料的折射率,则可根据实际情况先给定合适的值。采用严格耦合波分析方法<sup>[23-24]</sup>结合粒子群优化算法<sup>[25-26]</sup>对图 1 所示的结构进行设计和优化,所得参数如下: $x_1=0.37 \mu\text{m}, x_2=0.5 \mu\text{m}, x_3=0.58 \mu\text{m}, x_4=0.8 \mu\text{m}, x_5=0.9 \mu\text{m}, \Lambda=1 \mu\text{m}, \theta=0^\circ, t_g=0.64 \mu\text{m}, t_m=0.04 \mu\text{m}, t_b=1 \mu\text{m}$ 。

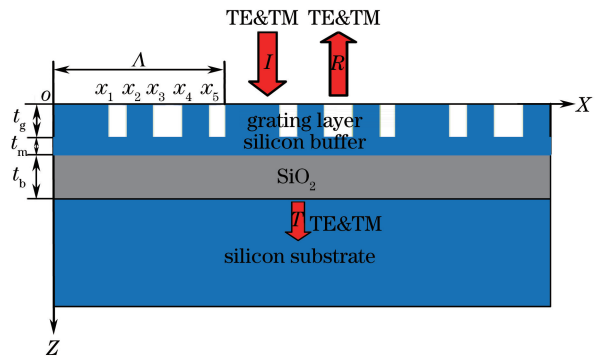


图 1 TE 和 TM 偏振光垂直入射时多层偏振无关光栅反射镜的结构示意图

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

然后采用电子束曝光(EBL)和感应耦合等离子(ICP)刻蚀工艺对器件进行制备,最后再对器件进行性能测试,图 2 所示为器件扫描电子显微镜(SEM)图样及测试反射谱线。如图 2 所示,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  $1.62 \sim 1.76 \mu\text{m}$  范围内反射率大于 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<sup>[22]</sup>。

由图 2 可知,理论计算值与实验测试结果还存在一定的偏差,这些差异主要是由以下几个因素造成的:1) 由于受空气氧化所致,光栅表面被一层薄

薄的氧化物所覆盖,而在理论计算时,并未考虑这层氧化物,从而会造成两者的偏差;2) 在加工过程中,光栅受刻蚀气体作用,其表面和侧壁并不完全光滑,这会造成光栅对入射光的吸收与散射;3) 实际介质材料的折射率与理论值会有所不同,这会影响光栅的衍射效率;4) 由于实际制作的光栅与设计的光栅尺寸不完全一致,从而影响了实际测试值。但是从总体上来看,图2的理论曲线和实验曲线还是比较吻合的,这表明该器件具有较好的误差性能,表现出良好的工艺制备特性。

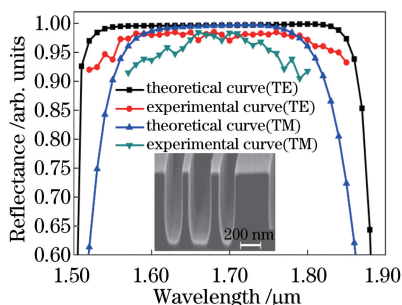


图2 TE和TM偏振光垂直入射时器件的SEM图样及反射谱  
Fig. 2 SEM image and reflectance spectra of the reflector normally illuminated by both TE and TM polarized waves

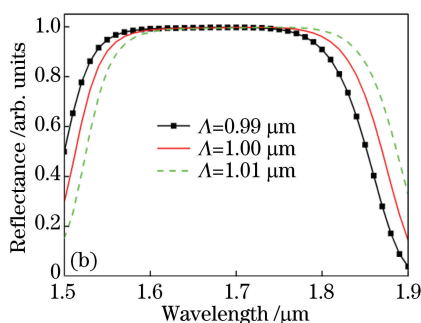
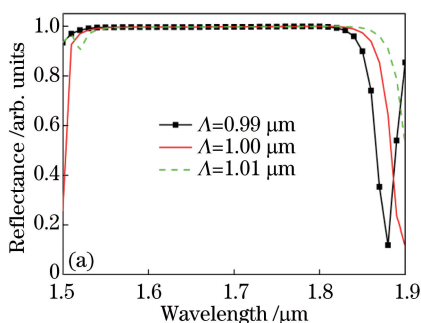


图3 光栅周期变化对器件反射谱的影响。(a) TE偏振光;(b) TM偏振光

Fig. 3 Influence of the variation of grating period on the reflectance spectrum of the device.

(a) TE polarized light; (b) TM polarized light

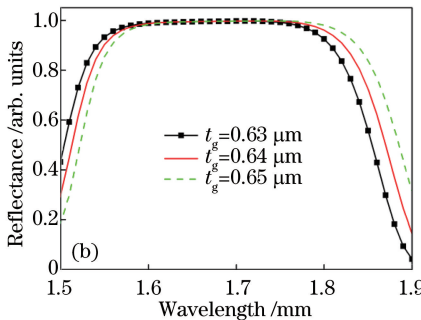
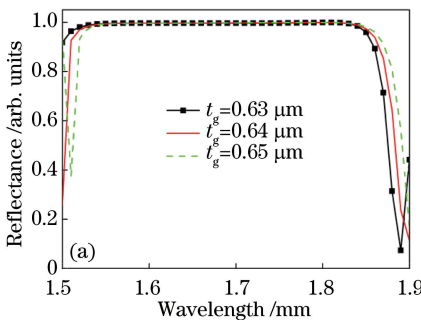


图4 光栅厚度变化对器件反射谱的影响。(a) TE偏振光;(b) TM偏振光

Fig. 4 Influence of the variation of grating thickness on the reflectance spectrum of the device.

(a) TE polarized light; (b) TM polarized light

### 3 参数分析

本节将通过数值分析考察此微纳谐振光栅反射镜的工艺容差性。具体来说,就是以器件反射谱为例,考察多齿光栅周期和厚度、光栅齿宽、中间层及缓冲层厚度等参数的变化对器件性能的影响。

在保持其他参数不变的情况下(下同),图3所示为光栅周期变化对偏振无关反射镜性能的影响。如图3所示,随着光栅周期的增大,器件反射谱将向长波长漂移,这是由于谐振位置受光栅周期影响所致<sup>[27]</sup>。但是在光栅周期变化20 nm范围内,对于TE和TM波来说,在所关注波段范围(1.62~1.76 μm)内,其对反射谱的影响很小,几乎可以忽略不计,这为此器件的制作带来了好处。

图4所示为光栅厚度变化对器件性能的影响。随着厚度的增加,有效波导层厚度也相应增加,这会引入反射谱向长波段漂移,但是在1.62~1.76 μm波段范围内,当厚度 $t_g$ 变化20 nm时,对于TE和TM偏振光来说,器件的反射谱变化很小,这有利于此器件的工艺制备,因为现代微纳制作工艺对20 nm精度的保证还是相对比较容易做到的。

另外,保持其他参数不变,考察调制形状工艺误差(光栅齿宽变化)对器件性能的影响,此处光栅齿宽定义为硅材料的两个光栅齿跳变点坐标之差,如第一光栅齿宽为  $x_1 - 0$ ,第二光栅齿宽为  $x_3 - x_2$ ,第三光栅齿宽为  $x_5 - x_4$ 。在分析调制形状工艺误差时,为了简化计算,分别改变了  $x_1$ 、 $x_3$ 、 $x_5$  的坐标参数,而其他值保持不变。如图 5 所示,当调制形状参数变化 20 nm 时,在 1.62~1.76  $\mu\text{m}$

波段范围内,其对器件反射谱的影响很小,几乎可以忽略不计。而对于 TM 偏振光来说,如图 6 所示,与改变其他两个光栅齿参数相比,增大第一个光栅齿宽,器件反射谱将向长波长漂移,这是因为增大第一个光栅齿宽能增加波导光栅的有效折射率,从而使得谱线漂移。综上所述,可以得出如下结论:该器件对调制形状参数变化表现出比较好的工艺容差性。

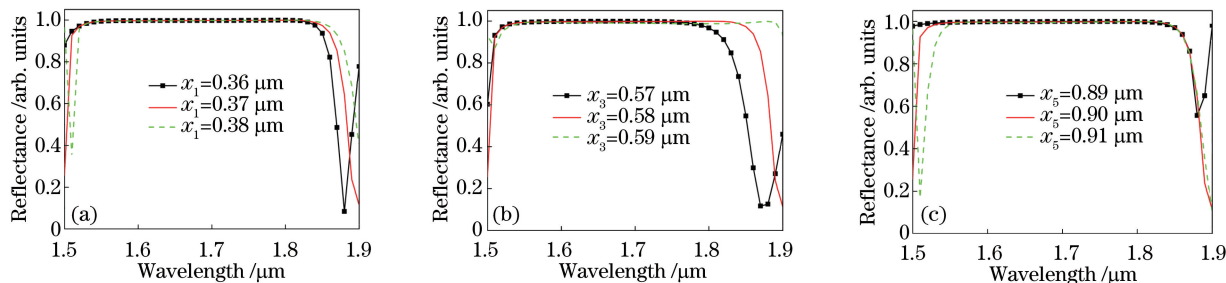


图 5 TE 光入射时(a)  $x_1$ 、(b)  $x_3$  和(c)  $x_5$  的变化对器件反射谱的影响

Fig. 5 Influence of the variation of (a)  $x_1$ , (b)  $x_3$  and (c)  $x_5$  on the reflectance spectrum of the device under TE light illumination

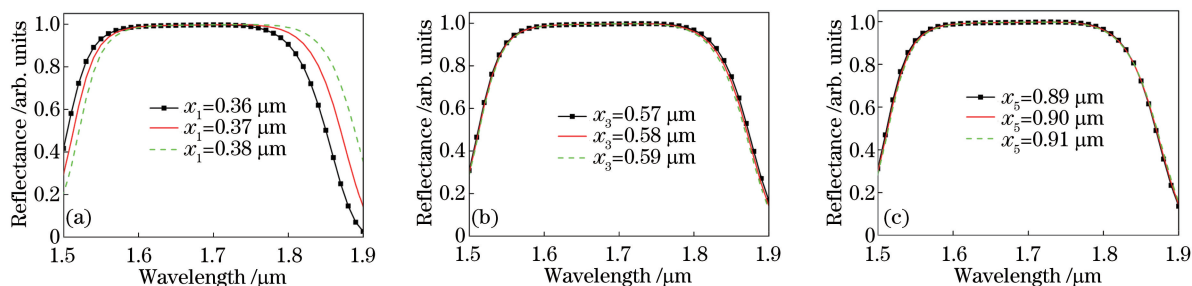


图 6 TM 光入射时(a)  $x_1$ 、(b)  $x_3$  和(c)  $x_5$  的变化对器件反射谱的影响

Fig. 6 Influence of the variation of (a)  $x_1$ , (b)  $x_3$  and (c)  $x_5$  on the reflectance spectrum of the device under TM polarized light

图 7 显示了器件反射谱随中间层厚度  $t_m$  的变化曲线。由图 7 可以看出,中间层厚度的变化能轻微地引起反射谱线的改变,即随着中间层厚度的增加,波导的有效厚度增加,从而使得反射谱向长波长移动。另外,图 7 还显示出当中间层厚度变化 20 nm 时,在 1.62~1.76  $\mu\text{m}$  波段范围内,其

对器件反射谱的影响几乎可以忽略不计,这点有利于器件的制作。

缓冲层厚度  $t_b$  的变化对偏振无关光栅反射镜反射谱的影响如图 8 所示。对于 TE 和 TM 偏振光,当缓冲层厚度变化 20 nm 时,器件反射谱几乎不改变。这说明,相对来说,器件对缓冲层厚度变化

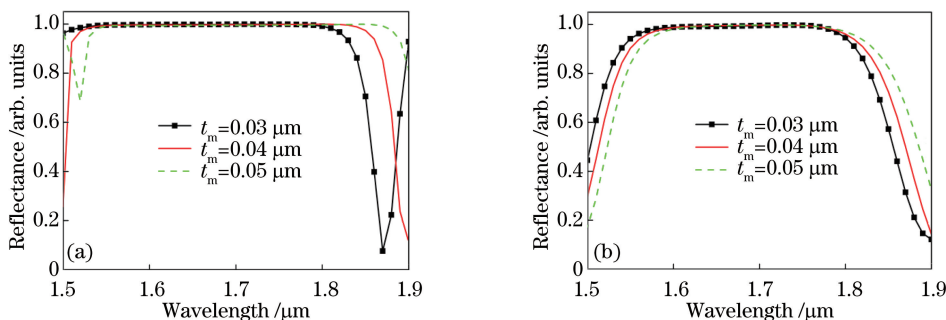


图 7  $t_m$  变化对器件反射谱的影响。(a) TE 偏振光;(b) TM 偏振光

Fig. 7 Influence of the variation of  $t_m$  on the reflectance spectrum of the device. (a) TE polarized light; (b) TM light illumination



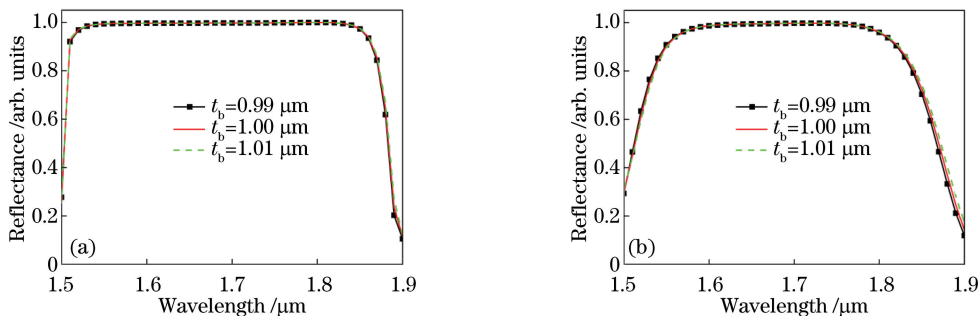


图 8  $t_b$  的变化对器件反射谱的影响。(a) TE 偏振光;(b) TM 偏振光

Fig. 8 Influence of the variation of  $t_b$  on the reflectance spectrum of the device. (a) TE polarized light; (b) TM polarized light

较不敏感。

综合以上分析可知,当微纳多齿谐振光栅的周期和厚度、光栅齿宽、中间层及缓冲层厚度变化 20 nm 时,在 1.62~1.76  $\mu\text{m}$  波段范围内,其对器件反射谱的影响几乎可以忽略不计,这有利于器件的制作。

## 4 结 论

通过严格耦合波分析方法,数值分析了宽带偏振无关多齿谐振光栅反射镜的工艺容差性。由参数分析可知,此器件表现出比较好的工艺容差性。在 1.62~1.76  $\mu\text{m}$  波段范围内,该器件关键结构参数的变化对器件反射谱的影响几乎可以忽略不计,这从另一个侧面再次说明了本课题组所设计的结构在保持高性能的同时,在现代微纳制备工艺误差范围内还具有良好的误差性能,表现出很好的制备工艺特性。

## 参 考 文 献

- [1] Lee Y C, Huang C F, Chang J Y, *et al.* Enhanced light trapping based on guided mode resonance effect for thin-film silicon solar cells with two filling-factor gratings[J]. *Optics Express* 2008, 16(11): 7969-7975.
- [2] Jiang X W. Influence of sub-wavelength grating on micro-electro-mechanical system wavelength tunable vertical cavity surface emitting laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 120501.  
江孝伟. 亚波长光栅对微机电系统波长可调谐垂直腔面发射激光器的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 120501.
- [3] Yu L, Liu L, Zhou Z, *et al.* High efficiency binary blazed grating coupler for perfectly-vertical and near-vertical coupling in chip level optical interconnections [J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 161-166.
- [4] Bao C, Hou J, Wu H, *et al.* Flat band slow light with high coupling efficiency in one-dimensional grating waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(1): 7-9.
- [5] Yoon J, Lee K, Wu W, *et al.* Wideband omnidirectional polarization-insensitive light absorbers made with 1D silicon gratings [J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(12): 1206-1212.
- [6] Wu W, Magnusson R. Total absorption of TM polarized light in a 100 nm spectral band in a nanopatterned thin a-Si film [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2103-2105.
- [7] Wang S S, Magnusson R, Bagby J S, *et al.* Guided-mode resonances in planar dielectric-layer diffraction gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(8): 1470-1475.
- [8] Wang S S, Magnusson R. Theory and applications of guided-mode resonance filters [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(14): 2606-2613.
- [9] Zhou Y, Huang M C Y, Chang-Hasnain C J, *et al.* high-index-contrast grating (HCG) and its applications in optoelectronic devices [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(5): 1485-1499.
- [10] Huang M C Y, Zhou Y, Chang-Hasnain C J. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1: 119-122.
- [11] Karagodsky V, Pesala B, Chang-Hasnain C J, *et al.* Monolithically integrated multi-wavelength VCSEL arrays using high-contrast gratings [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 694-699.
- [12] Tanzina K, Uddin J M, Magnusson R. Design and fabrication of broadband guided-mode resonant reflectors in TE polarization [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12348-23458.
- [13] Ko Y H, Niraula M, Lee K J, *et al.* Properties of

- wideband resonant reflectors under fully conical light incidence[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4542-4551.
- [14] Tian K, Zou Y G, Hai Y N, *et al.* Design of subwavelength anti-reflective grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0901004.  
田锬, 邹永刚, 海一娜, 等. 亚波长抗反射光栅的设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0901004.
- [15] Xiao Y, Huang L, Wu H, *et al.* A polarization selective beam splitter based on a subwavelength multisubpart profile grating structure [J]. *Optica Applicata*, 2016, 46(4): 665-672.
- [16] Popov E, Hoose J, Frankel B, *et al.* Low polarization dependent diffraction grating for wavelength demultiplexing [J]. *Optics Express*, 2004, 12(2): 269-275.
- [17] Shokooh-Saremi M, Magnusson R. New nonpolarizing resonant beam splitters [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(4): 670-676.
- [18] Alasaarela T, Zheng D, Huang L, *et al.* Single-layer one-dimensional nonpolarizing guided-mode resonance filters under normal incidence [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2411-2413.
- [19] Liu A, Fu F, Wang Y, *et al.* Polarization-insensitive subwavelength grating reflector based on a semiconductor-insulator-metal structure [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 14991-15000.
- [20] 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.
- [21] Zhou G R, Duan X F, Huang Y Q, *et al.* Design of polarization-insensitive broadband spectrum high-reflectivity mirror based on 2D subwavelength grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 032301.  
周顾人, 段晓峰, 黄永清, 等. 基于二维亚波长光栅的偏振不敏感宽光谱高反镜的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 032301.
- [22] Wu H M, Xiao Y S, Huang L Z, *et al.* A polarization independent reflector based on a multi-subpart profile resonant grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0913001.  
吴华明, 肖永生, 黄丽贞, 等. 基于多齿谐振光栅的偏振无关宽带反射镜的研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0913001.
- [23] Lee W, Degertekin F L. Rigorous coupled-wave analysis for multilayered grating structures [C]. *SPIE*, 2003, 4987: 264-273.
- [24] Lee W, Degertekin F L. Rigorous coupled-wave analysis for multilayered grating structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(10): 2359-2363.
- [25] 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.
- [26] Wu H M, Xu H H, Ma L F, *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.
- [27] Shokooh-Saremi M, Magnusson R. Wideband leaky-mode resonance reflectors: influence of grating profile and sublayers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 18249-18263.