

# A High Efficient Reflector Utilized by a Subwavelength Multi-Subpart Profile Grating Structure

Huaming Wu<sup>1,2\*</sup>, Huanghuang Xu<sup>1,2</sup>, Linfei Ma<sup>1,2</sup>, Yongsheng Xiao<sup>3</sup>, Lizhen Huang<sup>3</sup>, Wenbo Xiao<sup>1,2</sup>, Junhong Duan<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

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

<sup>3</sup>School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi  
Email: \*Cookey106@126.com

Received: Aug. 1<sup>st</sup>, 2016; accepted: Aug. 15<sup>th</sup>, 2016; published: Aug. 19<sup>th</sup>, 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

In this study, a high efficient reflector constructed by only a single layer subwavelength grating with multi-subpart profiles is addressed. The properties of the grating reflector are investigated by rigorous coupled-wave analysis. It is shown that for transverse electric (TE) polarized wave, over a broadband spectrum of 1.47 - 2.1  $\mu\text{m}$ , the reflector demonstrates high reflectivity ( $R_0 > 98.5\%$ ) and wide angular bandwidth (about  $28^\circ$ ) at 1.8  $\mu\text{m}$ . Effects of deviation from the design parameters on the reflection spectra are also presented.

## Keywords

Diffraction Gratings, Leaky Mode Resonance (LMR), Reflectors

# 宽带多齿谐振光栅反射镜的研究

吴华明<sup>1,2\*</sup>, 徐欢欢<sup>1,2</sup>, 马林飞<sup>1,2</sup>, 肖永生<sup>3</sup>, 黄丽贞<sup>3</sup>, 肖文波<sup>1,2</sup>, 段军红<sup>1,2</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 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. <http://dx.doi.org/10.12677/app.2016.68022>

<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

<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

<sup>3</sup>南昌航空大学信息工程学院，江西 南昌

Email: <sup>\*</sup>Cookey106@126.com

收稿日期：2016年8月1日；录用日期：2016年8月15日；发布日期：2016年8月19日

## 摘 要

本文中，基于单层多齿光栅结构，我们设计、优化了一种高性能的谐振光栅反射镜。严格耦合波分析算法表明，对于TE偏振光，此结构在1.47~2.1  $\mu\text{m}$ 宽谱范围内，其0级反射率大于98.5% ( $R_0 > 98.5\%$ )，在中心波长1.8  $\mu\text{m}$ 处，角度带宽约为28°。另外，我们还分析了此器件的工艺容差性能。

## 关键词

衍射光栅，泄露模谐振，反射镜

## 1. 引言

近年来，随着微纳光学和微细加工技术的发展，利用光栅结构简单、易于集成、制作工艺简单等优点，微纳光栅在缩小光电子器件的尺寸，减小器件的功耗，提高光电器件的集成度和性能，实现功能丰富的大规模光电集成电路等方面发挥着日益重要的作用[1] [2]。其中，基于泄露模谐振现象的微纳光栅，由于它特有的衍射特性及其巨大的科学意义和使用价值，吸引了世界各国科研工作者的目光。所谓泄露模谐振是指当入射光与光栅中的泄露模相位相匹配时，在光栅反射谱中，其0级反射率几乎将近100%的现象[3]。

1965年，Hessel和Oliner采用等效表面阻抗原理，提出了一种数学模型，用于解释谐振和Rayleigh波长现象[4]；随后，Popov [5]、Magnusson [6]、Friesem A A [7]等研究小组给出了弱调制光栅的近似泄露模谐振模型；2007年，Ding和Magnusson采用复频域的方法，给出了强调制光栅的一种半解析解[8]。随后，美国California大学伯克利分校的Chang-Hasnain C J课题组采用一种高折射率差的光栅(high-contrast gratings, HCGs)用于垂直腔表面激光器(vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSELs)中，它能高效的提供光学反馈、控制激光器输出波长及偏振性[9]-[11]。最近，Lee等报道了几种基于单层亚波长光栅的宽带反射镜[12] [13]。

另外，与单齿光栅相比，多齿光栅在设计自由度，控制光栅区域光场分布，操控光栅中泄露模的传播，阻止光栅中泄露模的快速衰减，实现全方位、宽谱及大角度响应具有巨大优势。据此，Hsu等基于多齿光栅结构，报道了一种宽带平坦陷波滤波器[14]；基于单层多齿亚波长光栅结构，Zhou等设计了一种宽带偏振分束器[15]；利用绝缘体上硅材料系统(Silicon-on-insulator, SOI)，基于一维多齿谐振光栅结构，我们优化设计了一种高性能非偏振光栅反射镜，分析表明，此器件还表现出较好的工艺容差性[16]。

然而，上述谐振结构或是结构复杂，或是受限于角度带宽等，不能很好的满足现代微纳光电集成发展方向，鉴于此，本文中，基于单层多齿亚波长光栅结构，我们将设计一种宽带、高反射率、大角度带宽的多齿谐振光栅反射镜。

## 2. 光栅反射镜的结构设计与结果分析

### 2.1. 多齿光栅反射镜的结构设计与优化

本小节中，我们将利用粒子群优化算法结合严格耦合波分析方法进行多齿光栅反射镜的结构设计与优化。

图 1 所示为所考虑的多齿光栅反射镜结构示意图。一束平面单色光垂直照射到此结构上，通过光栅层，TE 偏振光在 0 级被高效的反射。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。

根据粒子群优化算法，我们选定如下几个参数进行优化：光栅周期( $T$ )，厚度( $t_g$ )以及光栅跳变点( $x_1, x_2, x_3$ )。因此，定义

$$\mathbf{X} = \{T, t_g, x_1, x_2, x_3\} \quad (1)$$

为粒子。作为例子，我们只考虑 TE 波的情况。

适应度函数(FF)取最小均方误差函数[17]:

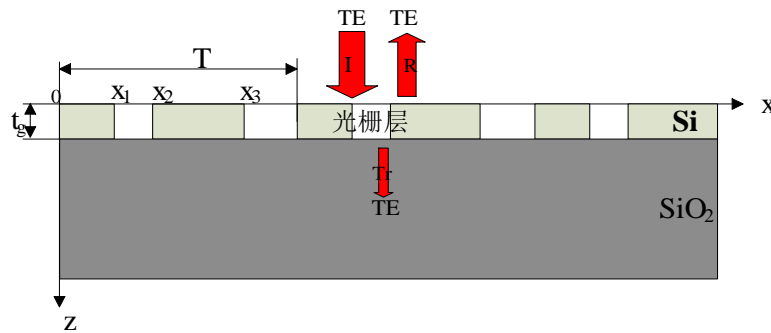
$$FF = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{\lambda_i} [R_{\text{desired}}(\lambda) - R_{\text{design}}(\lambda)] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

其中， $R_{\text{desired}}(\lambda)$  是要求反射率， $R_{\text{design}}(\lambda)$  是根据粒子群优化算法及严格耦合波得到的计算反射率， $M$  是波长取样点数。

根据此算法，我们得到的优化结果如下： $x_1/x_2/x_3 = 0.08/0.35/0.73 \mu\text{m}$ ,  $t_g = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $T = 1 \mu\text{m}$ 。

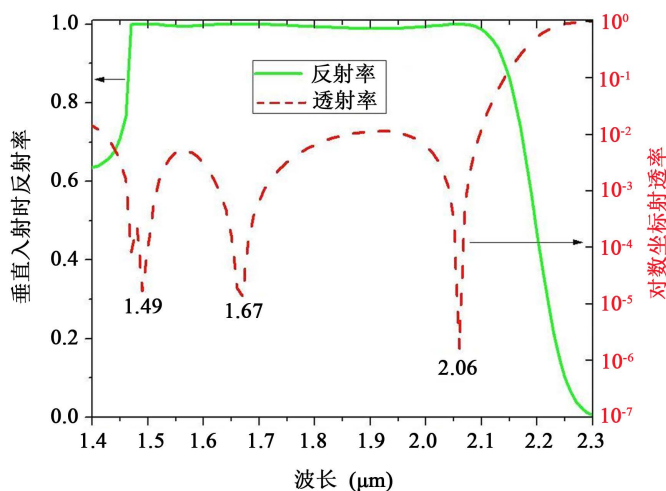
### 2.2. 多齿光栅反射镜计算结果及分析

如图 2 所示，为采用上述优化参数得到的二元多齿亚波长光栅反射镜线性坐标反射谱线及对数坐标透射谱线。由该图，我们可以清楚地看出，在 630 nm (1.47 到 2.1  $\mu\text{m}$ )宽谱范围内，此器件 TE 波的反射率大于 98.5% ( $R_0 > 98.5\%$ )。同时，如该器件透射率的对数坐标曲线所示，在 1.49, 1.67 和 2.06  $\mu\text{m}$  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[18]，这表明，此器件的高反射效率及宽带特性来源于此三个泄漏模谐振的共存及相互作用。另外，此反射镜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多齿形状调制有关[19]。高折射率差的光栅层能够扩展谐振区域，从而有利于高反



**Figure 1.** Schematic of a reflector with multi-subpart profile grating.  $T$ ,  $t_g$ , 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. I, R and Tr are incident light, reflected and transmitted waves, respectively. The parameters are:  $n_{\text{air}} = 1.0$ ,  $n_{\text{Si}} = 3.48$ ,  $n_{\text{silica}} = 1.47$

**图 1.** 二元多齿亚波长光栅反射镜结构示意图。 $T$ ,  $t_g$ ,  $x_1$ , 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。介质折射率参数如下:  $n_{\text{air}} = 1.0$ ,  $n_{\text{Si}} = 3.48$ ,  $n_{\text{silica}} = 1.47$



**Figure 2.** Reflectance and transmittance spectra of a wideband reflector on linear and logarithmic scales. The resonance wavelengths are 1.49, 1.67 and 2.06  $\mu\text{m}$ , respectively  
**图 2.** 多齿光栅反射镜线性坐标反射谱线及对数坐标透射谱线。谐振波长分别为：1.49, 1.67 和 2.06  $\mu\text{m}$

射率、宽带特性的形成，而且，顶层多齿光栅的形状调制能够有效防止 TE 偏振光泄漏模的快速衰减，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。

如图 3 所示，为该反射镜在 1.4 到 2.3  $\mu\text{m}$  波长范围内，反射率随入射角度变化率。如图所示，在此波段范围内，反射率对入射角度变化比较敏感，当入射角度大于  $1^\circ$  时，在高反射率、平坦的反射曲线上会出现反射凹点。随着入射角度的逐渐增大，反射凹点越来越下陷，且高反射率波段逐渐变窄。这是由于在倾斜角度入射情况下，TE 波泄漏模的缓变衰减状态会被破坏，从而引起器件性能的变化[20]。当入射角度偏离垂直入射时，由于谐振位置空间对称性遭到破坏，谐振场不再相互交叠，每个谐振峰被分裂成两个峰，从而引起反射谱中反射凹点的出现[21] [22]。

此外，我们还考察了此器件在中心波长附近(1.8  $\mu\text{m}$ )反射率随入射角度变化情况。如图 4 所示，此器件在  $-14^\circ \sim 14^\circ$  角度范围内，TE 偏振光的反射率大于 99%。同样，此大角度带宽也源于泄漏模谐振的共存及相互作用[23]。通常情况下，具有单个谐振峰值的泄漏模谐振器件，由于反射率随入射角度的快速变化，其角度带宽一般比较小[24]；而由于材料的高折射率差以及顶层多齿光栅形状的调制作用，此反射镜能在比较宽的角度范围内显示出很高的反射率，因此不难理解此器件在 1.8  $\mu\text{m}$  处的大角度带宽。

我们还用时域有限差分算法(finite-difference time-domain method, FDTD)验证了此结构。在 1.8  $\mu\text{m}$  处，TE 偏振光垂直照射到此器件上，经光栅作用，其被高效的反射，如图 5 所示，这验证了此结构设计的正确性。

### 3. 结构参数对反射谱的影响

本小节中，我们将讨论该反射镜的工艺容差性，即考察多齿光栅周期、厚度以及调制形状等参数变化对此器件性能的影响。

图 6 所示为多齿光栅周期及厚度变化对反射镜性能的影响。如图 6(a)所示，随着光栅周期的增大，反射镜反射谱将向长波长移动，这是由于对于宽谱光栅反射镜来说，其谐振位置会受光栅周期影响，随着光栅周期的增大，其谐振位置向长波长漂移，从而使得反射谱向长波长移动[18]。但是在光栅周期变化 20 nm 范围内，其反射谱的影响很小，几乎可以忽略不计，这为此器件的制作带来了好处。

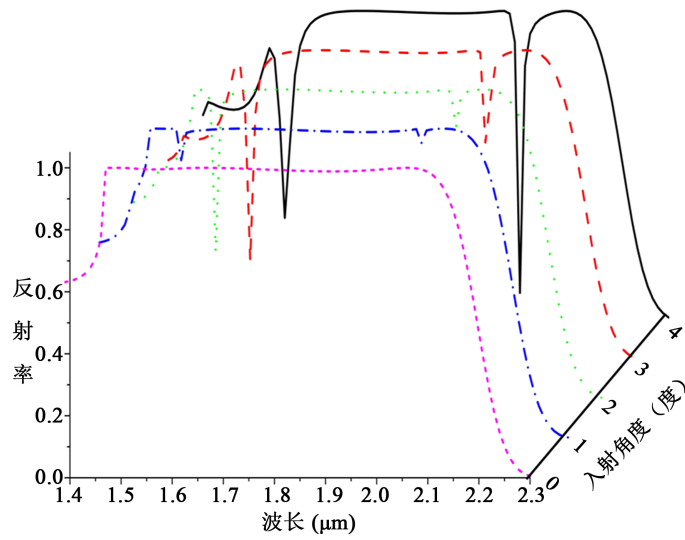


Figure 3. Reflection spectra as a function of the incident angle

图 3. 多齿光栅反射率随入射角度变化曲线

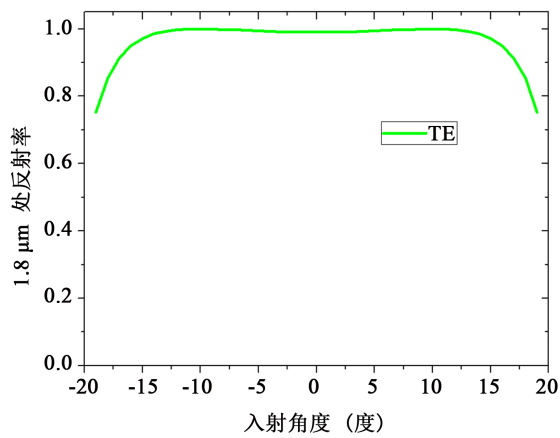


Figure 4. Angular spectra at the wavelength of 1.8  $\mu\text{m}$

图 4. 在 1.8  $\mu\text{m}$  处, 反射率随入射角度变化曲线

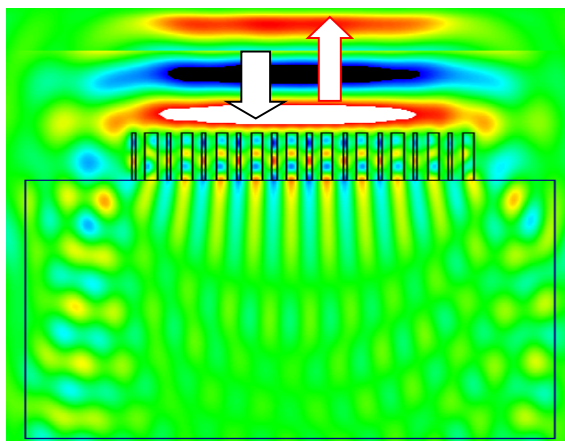
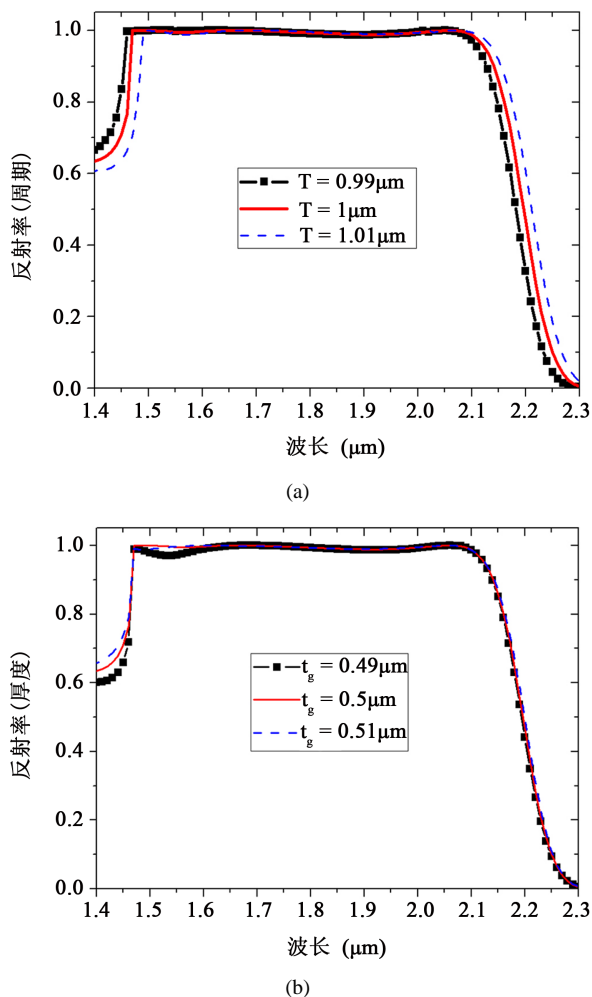


Figure 5. FDTD simulation result at 1.8  $\mu\text{m}$  normally illuminated by TE polarized input wave

图 5. 在 1.8  $\mu\text{m}$  处, TE 偏振光垂直入射时, FDTD 模拟结果



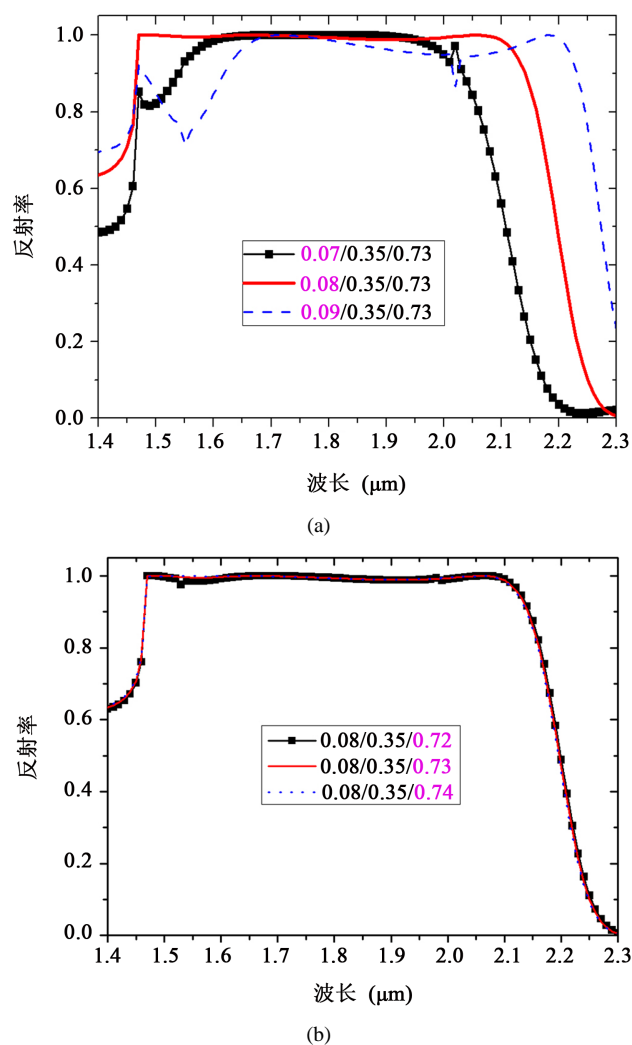
**Figure 6.** Spectra of variations in period and thickness. (a) Spectra for structures with different periods; (b) Spectra for structures with different thicknesses.  
**图 6.** 光栅周期及厚度变化对反射镜性能的影响

图 6(b)所示为厚度变化对器件性能的影响。由图可知，当厚度  $t_g$  变化 20 nm 时，在 1.47~2.1 μm 波段范围内，反射镜的反射谱变化很小，这有利于此器件的工艺制作，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。

而调制形状工艺误差对光栅反射镜性能的影响，如图 7(a)和图 7(b)所示。对比这两图发现，器件对二元块( $x_1$ )的尺寸变化比对二元块( $x_3$ )变化敏感，这是因为相对来说，在 20 nm 变化范围内，泄漏模谐振状态对二元块( $x_1$ )尺寸变化更敏感，从而使得此器件的性能变差。从等效介质理论来说，第一二元块( $x_1$ )尺寸变化 20 nm，其所占比重为 25%[(变化尺寸)20/80(优化尺寸) = 0.25]，它对泄漏模谐振状态影响较大；而对于第二二元块( $x_3$ )来说，其变化尺寸所占比重约为 3%[(变化尺寸)20/730(优化尺寸) = 0.0274]，它几乎不影响泄漏模谐振状态，从而我们得出二元块( $x_1$ )尺寸变化对泄漏模谐振状态影响较大。

#### 4. 小结

本文中，我们重点讨论了一种基于二元多齿光栅的宽带反射镜。采用了严格耦合波分析方法结合粒子群优化算法对其进行设计和优化。在 1.47~2.1 μm 宽谱范围内，此器件反射率大于 98.5%，在中心波长 1.8 μm 处，角度带宽为 28°。另外，我们还讨论了该反射镜的工艺容差性。数值分析表明，多齿光栅周期



**Figure 7.** Spectra of variations in modulation profile. (a) Spectra for structure with differing the first high-index binary block ( $x_1$ ); (b) Spectra for structure with differing the second high-index binary block ( $x_3$ ).

**图 7.** 调制形状变化对非均匀光栅反射镜性能影响

或厚度变化 20 nm 范围内，其对器件反射率影响很小，这点有利于此结构的工艺制作；对于调制形状参数变化，器件对二元块( $x_1$ )的尺寸变化比二元块( $x_3$ )变化敏感。该反射镜可用于调谐，垂直腔表面激光发射器以及宽带滤波等器件中。

## 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宝贵意见，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。

## 资助信息

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] 王阳元. 历史机遇和我国微电子发展之路[J]. 中国集成电路, 2005(3): 30-38.
- [2] 周治平. 硅基光电子学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012: 3-5.
- [3] Liu, Z.S., Tibuleac, S., Shin, D., *et al.* (1998) High-Efficiency Guided-Mode Resonance Filter. *Optics Letters*, **23**, 1556-1558. <http://dx.doi.org/10.1364/ol.23.001556>
- [4] Hessel, A. and Oliner, A.A. (1965) A new Theory of Wood's Anomalies on Optical Gratings. *Applied Optics*, **10**, 1275-1297. <http://dx.doi.org/10.1364/ao.4.001275>
- [5] Popov, E., Mashev, L. and Maystre, D. (1986) Theoretical Study of the Anomalies of Coated Dielectric Gratings. *Optica Acta*, **33**, 607-619. <http://dx.doi.org/10.1080/713821994>
- [6] Wang, S.S. and Magnusson, R. (1993) Theory and Applications of Guided-Mode Resonance Filters. *Applied Optics*, **32**, 2606-2613. <http://dx.doi.org/10.1364/ao.32.002606>
- [7] Sharon, A., Rosenblatt, D. and Friesem, A.A. (1997) Resonant Grating-Waveguide Structures for Visible and Near-Infrared Radiation. *Journal of the Optical Society of America*, **14**, 2985-2993. <http://dx.doi.org/10.1364/josaa.14.002985>
- [8] Ding, Y. and Magnusson, R. (2007) Band Gaps and Leaky-Wave Effects in Resonant Photonic-Crystal Waveguides. *Optics Express*, **15**, 680-694. <http://dx.doi.org/10.1364/oe.15.000680>
- [9] Huang, M.C.Y., Zhou, Y. and Chang-Hasnain, C.J. (2007) A Surface-Emitting Laser Incorporating a High-Index-Contrast Subwavelength Grating. *Nature Photonics*, **1**, 119-122. <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2006.80>
- [10] Zhou, Y., Huang, M.C.Y., Chang-Hasnain, C.J., *et al.* (2009) High-Index-Contrast Grating (HCG) and Its Applications in Optoelectronic Devices. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **15**, 1485-1499. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTQE.2009.2021145>
- [11] Karagodsky, V., Pesala, B., Chang-Hasnain, C.J., *et al.* (2010) Monolithically Integrated Multi-Wavelength VCSEL Arrays Using High-Contrast Gratings. *Optics Express*, **18**, 694-699. <http://dx.doi.org/10.1364/oe.18.000694>
- [12] Lee, K.J. and Magnusson, R. (2011) Single-Layer Resonant High Reflector in TE Polarization: Theory and Experiment. *IEEE Photonics Journal*, **3**, 123-129. <http://dx.doi.org/10.1109/jphot.2011.2108645>
- [13] Tanzina, K., Uddin, J.M. and Magnusson, R. (2014) Design and Fabrication of Broadband Guided-Mode Resonant Reflectors in TE polarization. *Optics Express*, **22**, 12349-12358.
- [14] Hsu, C., Wu, M., Liu, Y., Lee, Y. and Chang, J. (2006) Flattened Broadband Notch Filters Using Guided-Mode Resonance Associated with Asymmetric Binary Gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, **18**, 2572-2574. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2006.887193>
- [15] Wu, H., Mo, W., Hou, J., Gao, D., Hao, R., Guo, R., Wu, W. and Zhou, Z. (2010) Polarizing Beam Splitter Based on a Subwavelength Asymmetric Profile Grating. *Journal of Optics*, **12**, Article ID: 015703. <http://dx.doi.org/10.1088/2040-8978/12/1/015703>
- [16] Huang, L., Liang, D., Zeng, J., Xiao, Y. and Wu, H. (2015) A Broadband Multilayered Nonpolarization Resonant Reflector. *IEEE Photonics Journal*, **7**, Article ID: 6500306. <http://dx.doi.org/10.1109/jphot.2015.2451650>
- [17] 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. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.32.000894>
- [18] Shokooh-Saremi, M. and Magnusson, R. (2008) Wideband Leaky-Mode Resonance Reflectors: Influence of Grating Profile and Sublayers. *Optics Express*, **16**, 18249-18263. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.16.018249>
- [19] 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. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2003.821258>
- [20] Sang, T., Wang, L., Wang, Z., *et al.* (2009) Systematic Study of the Mirror Effect in a Poly-Si Subwavelength Periodic Membrane. *J. Opt. Soc. Amer. A*, **26**, 559-565. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.26.000559>
- [21] Liu, Z.S., Tibuleac, S., Shin, D., *et al.* (1998) High-Efficiency Guided-Mode Resonance Filter. *Optics Letters*, **23**, 1556-1558. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.23.001556>
- [22] Wei, C., Liu, S., Deng, D., *et al.* (2006) Electric Field Enhancement in Guided-Mode Resonance Filters. *Optics Letters*, **31**, 1223-1225. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.31.001223>
- [23] Magnusson, R. and Shokooh-Saremi, M. (2008) Physical Basis for Wideband Resonant Reflectors. *Optics Express*, **16**, 3456-3462. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.16.003456>
- [24] Ding, Y. and Magnusson, R. (2004) Doubly Resonant Single-Layer Bandpass Optical Filters. *Optics Letters*, **29**, 1135-1137. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.29.001135>



**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>