

文章编号: 1001-3806(2016)01-0118-04

# 可见光波段的窄带导模共振滤光片的设计

郑煌晏, 胡芳仁\*

(南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210023)

**摘要:** 为了使导模共振滤光片能在可见光范围内表现出良好的滤光效果, 根据严格耦合波理论和等效介质理论, 提出基于半导体材料单晶氧化锌薄膜的亚波长导模共振光栅滤光片的结构设计。通过仿真分析可知, 该滤光片在可见光范围内的 475nm, 530nm 与 650nm 波长处, 反射效率都达到了 100%, 旁带反射率低于 4%, 并且峰值带宽均小于 0.3nm。结果表明, 该滤光片能分别在可见光的红、绿、蓝波段表现出良好的滤光效果, 可以作为三基色的滤光片, 在彩色合成与调制中得到重要的应用。

**关键词:** 光栅; 滤光片; 导模共振; 氧化锌**中图分类号:** TN253; O436 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.026

## Design of narrowband guided-mode resonance filters in visible wavelength region

ZHENG Huangyan, HU Fangren

(School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In order to achieve good filter performance of guided-mode resonance filters (GMRF) in visible light region, according to rigorous coupled wave theory and equivalent medium theory, a subwavelength GMRF filter was designed based on semiconductor material of ZnO. Simulation and analysis showed that reflection efficiency reached 100% at 475nm, 530nm and 650nm, with sideband reflectance below 4% and bandwidth less than 0.3nm. The results show that GMRF has excellent performance in red, green and blue wavelength region of visible light. GMRFs can be used as three-primary-color filters and are useful for color synthesis and modulation.

**Key words:** grating; filter; guided-mode resonance; ZnO

### 引言

导模共振效应是波导所支持的导模(泄漏模)受到光栅衍射级次的激发, 从而引起衍射光场能量的重新分配, 使光场相对于入射角或波长等物理量的微小变化而出现突变<sup>[1-2]</sup>。导模共振现象自从 MAGNUSON 在 1992 年提出以来<sup>[3]</sup>, 就一直是光学领域关注和研究的热点。基于导模共振效应的亚波长光栅是一种新型的衍射光学元件, 具有衍射效率高、共振波长和带宽可控以及结构相对简单等特性<sup>[4-6]</sup>。因此, 利用这些特性可以制作各种高效的窄带反射滤波器或者可调滤波器<sup>[7-10]</sup>, 在光通信、生物、医学等领域有广泛的应

用<sup>[11-12]</sup>。

ZnO 是一种新型的直接带隙宽禁带半导体材料, 具有优越的光电性质<sup>[13]</sup>。对其它宽带半导体材料而言, ZnO 比较容易生长大尺寸的体单晶, 可以为新型的半导体光电子和发光器件的发展提供理想的衬底材料, 在紫外发光二极管和深紫外探测器等方面具有广阔的应用前景<sup>[14-15]</sup>。然而到目前为止, 使用 ZnO 制作弱调制光栅结构的共振波长在可见光范围内具有高反射率、窄线宽和低旁带反射的导模共振滤波器却少有报道。

作者基于单晶 ZnO 薄膜材料, 将薄膜光学中的减反射效应与导模共振效应结合起来, 通过对光栅浮雕结构和波导层厚度进行优化, 在可见光的红绿蓝波段范围内获得性能优良的窄带滤光片, 并详细讨论了影响共振峰分布特性的几个主要因素(光栅周期、光栅厚度以及入射角度)对共振峰分布的影响。

### 1 理论模型

如图 1 所示, 平面波以与  $z$  轴成  $\theta_0$  角入射, 在衬

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61274121); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012829); 南京邮电大学人才引进科研启动基金资助项目(NY212007)

作者简介: 郑煌晏(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光材料与光学器件。

\* 通讯联系人。E-mail: hufr@njupt.edu.cn

收稿日期: 2014-12-01; 收到修改稿日期: 2014-12-26

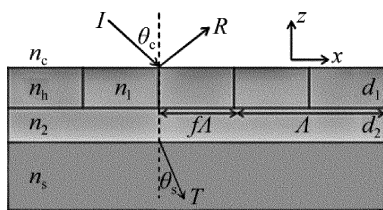


Fig. 1 Structure of double layer guided-mode resonant grating filter

底中以  $\theta_s$  角透射出来,  $I, R$  和  $T$  分别是入射波、反射波与透射波, 覆盖层和衬底层的折射率分别为  $n_c$  和  $n_s$ , 光栅层由高低折射率分别为  $n_h$  和  $n_1$  的两种介质构成, 光栅周期为  $\Lambda$ , 占空比为  $f$ , 波导层的折射率为  $n_2$ , 光栅层和波导层的厚度分别为  $d_1$  和  $d_2$ , 并且各层都是各向同性的均匀介质。

根据参考文献 [16], 双层波导结构的本征方程为:

$$P_c A + P_c P_s B + C + P_s D = 0 \quad (1)$$

式中,  $A, B, C$  和  $D$  分别为特征矩阵的分量:

$$\begin{cases} A = \cos\gamma_1 \cos\gamma_2 - \frac{P_2}{P_1} \sin\gamma_1 \sin\gamma_2 \\ B = -\frac{i}{P_2} \sin(\gamma_1 + \gamma_2) \\ C = -i(P_1 \sin\gamma_1 \cos\gamma_2 + P_2 \sin\gamma_2 \cos\gamma_1) \\ D = \cos\gamma_1 \cos\gamma_2 - \frac{P_1}{P_2} \sin\gamma_1 \sin\gamma_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\gamma_1 = k_0 d_1 P_1$ ,  $\gamma_2 = k_0 d_2 P_2$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ; 而  $P_1, P_2, P_c, P_s$  分别为:

$$\begin{cases} P_1 = \left[ n_1^2 - \left( \frac{\beta}{k_0} \right)^2 \right]^{1/2} \\ P_2 = \left[ n_2^2 - \left( \frac{\beta}{k_0} \right)^2 \right]^{1/2} \\ P_c = \left[ n_c^2 - \left( \frac{\beta}{k_0} \right)^2 \right]^{1/2} \\ P_s = \left[ n_s^2 - \left( \frac{\beta}{k_0} \right)^2 \right]^{1/2} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\beta$  为波导层的横传播常数, 是一个固定值。根据等效介质理论, 可以把光栅层当作与其等效折射率相等的均匀膜层,  $n_1$  等于光栅层的等效折射率  $n_{av}$ , 对于 TE 模, 它在亚波长量级和弱调制模式的二级近似表达式为:

$$n_1 = n_{av} = [fn_h^2 + (1-f)n_1^2]^{1/2} \quad (4)$$

同时, 为了提高滤光片的衍射效率, 将减反射膜设计运用到滤光片中, 这样可以得到共振波长处的高反射率以及低旁带, 从而得到较好的滤光效果。

## 2 数值计算模拟与分析

对图 1 所示的结构模型, 作者用单晶 ZnO 薄膜材

料充当光栅层的高折射率区和波导层的介质, 光栅层低折射率材料为氮化硅, 衬底是石英材料, 覆盖层为空气, 如图 2 所示, 此时  $n_h = n_2 = 2.01, n_1 = 1.9, n_c = 1$ , 同时考虑石英材料的色散特性, 在不同的入射波长取不同的折射率, 光栅层的占空比取为  $f = 0.5$ , 由 (4) 式可以得到光栅层的等效折射率  $n_1 = 1.95$ 。

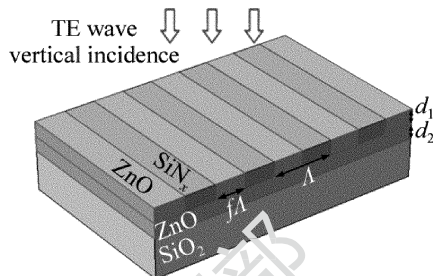


Fig. 2 Structure of double layer guided-mode resonant grating filter based on ZnO

由导模共振的本征方程 (1) 式可以计算出, 在 TE 波垂直入射的情况下, 当各层厚度分别为  $d_1 = 60\text{nm}$  和  $d_2 = 57.5\text{nm}$ , 光栅周期  $\Lambda = 280\text{nm}$ ,  $n_s = 1.478$ , 可以得到中心波长在  $475\text{nm}$  (蓝光) 处的共振波长, 其光谱曲线如图 3a 所示, 由图中可以看到, 反射峰的反射率

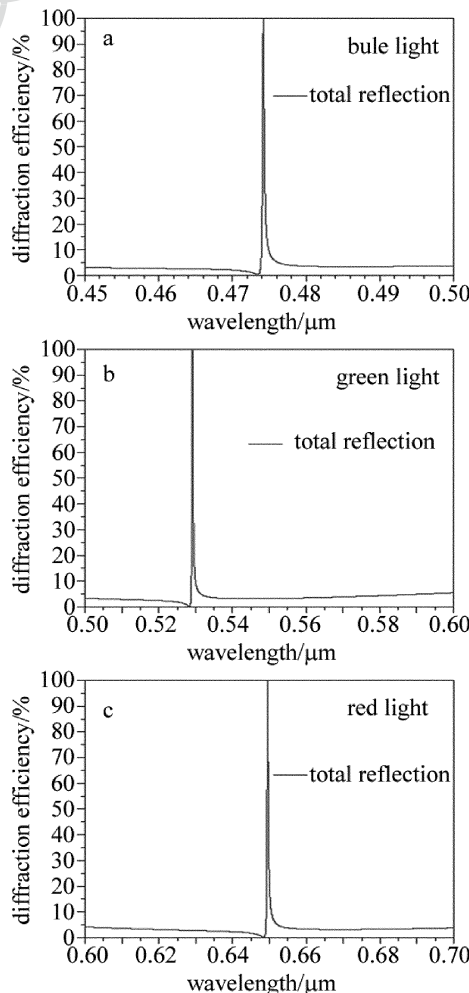


Fig. 3 Spectra of GMRF at different resonant wavelengths

接近了100%，旁带反射率低于3%，并且峰值带宽只有0.2nm。对于中心波长位于530nm(绿光)时，如图3b所示， $d_1 = 68\text{nm}$ ， $d_2 = 66.2\text{nm}$ ，光栅周期 $\Lambda = 312\text{nm}$ ， $n_s = 1.475$ ，旁带反射率低于3.5%，并且峰值带宽同样只有0.2nm。同样当中心波长位于650nm(红光)的情况，也能得到较好的反射特性，如图3c所示， $d_1 = 68\text{nm}$ ， $d_2 = 81\text{nm}$ ，光栅周期 $\Lambda = 383\text{nm}$ ， $n_s = 1.472$ ，旁带反射率低于4%，峰值带宽为0.3nm。

从上面的模拟计算结果可以看出，该结构的导模共振滤波片在可见光的红、绿、蓝波段都分别表现出了良好的滤光效果，所以可以作为三基色的滤光片，对于彩色合成和调制有一定的应用前景。

同时由双层波导光栅结构对应的平面波导模式本征方程易知，当波导光栅结构参量发生改变，必然会导致本征方程解发生改变，从而共振波长位置也会随之发生改变。如图4所示，随着光栅周期的增加，共振峰处的中心波长也相应地随着增加，并且两者成线性关系。如图5所示，随着光栅厚度的增加，共振峰处的中心波长也相应地随着增加，并且两者也可以看作是线性关系。

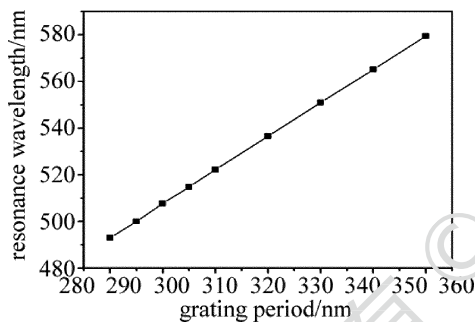


Fig. 4 Relationship between resonance wavelength and grating period

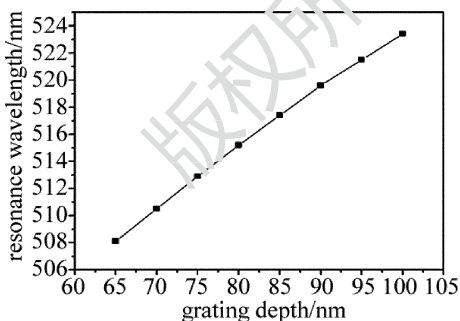


Fig. 5 Relationship between resonance wavelength and grating depth

如果保持其它条件不变，只改变入射光的角度，结果可以看到在衍射光谱中共振峰发生了偏移，并同时出现两个共振峰，如图6所示。这是因为斜入射使得该结构光栅所支持的导波模发生了分裂。根据导波模式公式，在斜入射的情况下， $\pm 1$ 级倏逝衍射波所对应的导波模 $k_{x,+1}$ 和 $k_{x,-1}$ 分别对应两种不同的导波模，从而分裂开来形成了两个共振峰。如图6所示，保持其它

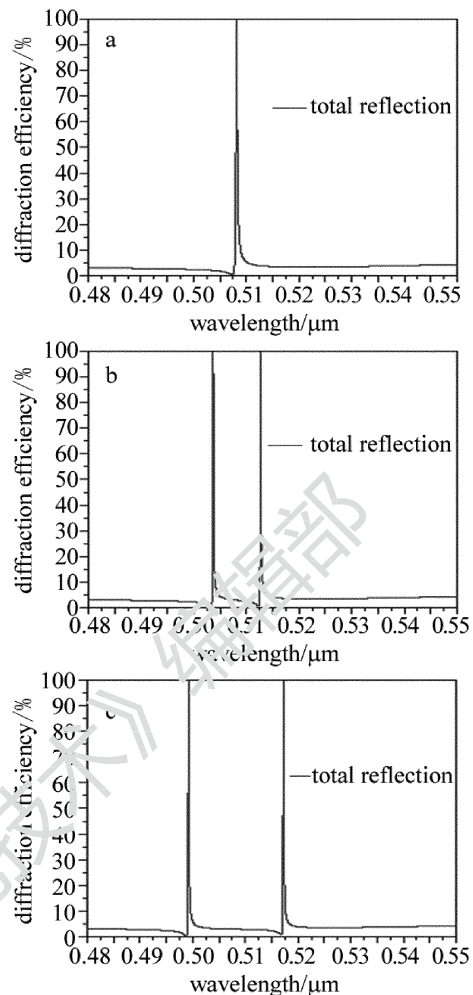


Fig. 6 Spectra at different incident angles  
a— $\theta_c = 0^\circ$  b— $\theta_c = 1^\circ$  c— $\theta_c = 2^\circ$

参量值不变的情况下，随着角度的增大，两个共振峰的间距也逐渐变大，可以看出，该结构对入射波有很好的角度敏感性。

### 3 结论

提出基于半导体材料单晶氧化锌薄膜的亚波长导模共振光栅滤波片的结构设计。分别得到在475nm, 530nm与650nm处的反射光谱，其表现出了良好的滤光效果，反射率达到了100%，旁带反射率低于4%，并且峰值带宽均小于0.3nm，并讨论了影响共振峰分布特性的几个主要因素(光栅周期、光栅厚度以及入射角度)对共振波长的影响，发现共振波长分别随着光栅周期和厚度的增大而增大，并都相应地表现出线性关系。而且随着入射角度的改变，共振峰会分裂成两个共振峰，并且随着角度的增大，两个共振峰的间距也逐渐拉大，表现出极大的角度敏感性。基于该滤光片能分别在可见光的红、绿、蓝波段表现出良好的滤光效果，所以可以作为三基色的滤光片，应用在彩色合成与调制中。

## 参 考 文 献

- [1] GOLUBENKOG A, SVAKHIN A S, SYCHUGOV V A, *et al.* Phenomenon of full external reflection of light from the surface of a corrugated dielectric waveguide and its use in narrow band filters[J]. Soviet Physics-Lebedev Institute Reports, 1985, 15(11):36-40.
- [2] POPOV E, MASHEV L, MAYSTRE D. theoretical study of the anomalies of coated dielectric gratings[J]. Journal of Modern Optics, 1986, 33(5):607-619.
- [3] MAGNUSSON R, WANG S S. New principle for optical filters[J]. Applied Physics Letters, 1992, 61(9):1022-1024.
- [4] TIBULEAC S, MAGNUSSON R. Reflection and transmission guided-mode resonance filters [J]. Journal of the Optical Society of America, 1997, 14(7):1617-1626.
- [5] WANG Q, ZHANG D W, CHEN J P, *et al.* Recent progress of guided-mode resonance filters[J]. Laser Technology, 2010, 34(1):71-74(in Chinese).
- [6] KONG W J, ZHENG B B, YUN M J, *et al.* Guided-mode resonance filter with narrow waveband for three primary colors [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10):57-60(in Chinese).
- [7] MA J Y, LIU S J, WEI C Y, *et al.* Design of reflection resonant grating filters[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(2):827-833(in Chinese).
- [8] SANG T, CAI T, LIU F, *et al.* Design and analysis of guided-mode resonance filter containing an absentee layer with an antireflective surface[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2):334-339(in Chinese).
- [9] SONG J Y, FENG S F, ZHANG X P, *et al.* Optical filtering and angle-resolved tuning properties of the waveguided grating structures [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9):6542-6548(in Chinese).
- [10] ZHAO H, ZHU B, HU F R, *et al.* Design and simulation of guided-mode resonance filter based on GaN[J]. Study on Optical Communications, 2014, 186(6):55-58(in Chinese).
- [11] MA J Y, LIU S J, WEI C Y, *et al.* Design and analysis of double layer resonant grating filters in the visible spectral region[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(7):4195-4201(in Chinese).
- [12] GUO L W, MA J Y. High-sensitive biosensor based on GMR in self-suspended grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(12):1483-1487(in Chinese).
- [13] QIN Y W. Study on optical coherence tomography detection of ZnO film[J]. Laser Technology, 2014, 38(6):845-847(in Chinese).
- [14] SUN H, ZHANG Q F, WU J L. Ultraviolet light emitting diode based on ZnO nanowires[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(6):3479-3482(in Chinese).
- [15] SHEN D Z, MEI Z X, YANG H L, *et al.* ZnO-based material, heterojunction and photoelectric device[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(1):1-60(in Chinese).
- [16] WANG S S, MAGNUSSON R. Transmission bandpass guided-mode resonance filters[J]. Applied Optics, 1995, 34(35):8106-8109.