

doi:10.3788/gzxb20174612.1223001

## 基于导模共振的窄带可调谐滤波器

黑徐伟<sup>1,2,3</sup>, 章羚璇<sup>2,3,4</sup>, 刘继红<sup>1</sup>, 葛志强<sup>2,3,4</sup>, 李思奇<sup>2,3,4</sup>,  
李星仪<sup>2,3,4</sup>, 王国玺<sup>2,3,4</sup>, 王播然<sup>2,3,4</sup>, 张文富<sup>2,3,4</sup>

(1 西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

(2 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(3 中英联合微纳光子学研究中心, 西安 710119)

(4 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**提出了一种分离的导模共振滤波器.该结构由光栅层和两个被空气薄层隔开的平板介质波导组成.使用时域有限差分法分析了该光栅结构在不同的结构参数下的光谱特性.研究表明,当 TM 偏振入射时改变空气薄层的厚度可以实现共振波长的可调谐,并且共振波长几乎随着空气薄层厚度线性变化.浅调制光栅被用于实现窄线宽特性.波长可调谐范围为 1 515~1 558 nm,半高全宽小于 0.6 nm.

**关键词:**光栅;导模共振;窄带;滤波器;可调谐

中图分类号:TN713

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)12-1223001-5

## Tunable Narrowband Filter Based on Guided Mode Resonance

HEI Xu-wei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ling-xuan<sup>2,3,4</sup>, LIU Ji-hong<sup>1</sup>, GE Zhi-qiang<sup>2,3,4</sup>,

LI Si-qi<sup>2,3,4</sup>, LI Xing-yi<sup>2,3,4</sup>, WANG Guo-xi<sup>2,3,4</sup>, WANG Lei-ran<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Wen-fu<sup>2,3,4</sup>

(1 School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

(2 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an 710119, China)

(3 China-UK Joint Research Center of Micro/Nano Photonics, Xi'an 710119, China)

(4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A separated guided-mode resonance filter was presented, which consisted of a grating layer and two planar dielectric waveguide layers partitioned by an air gap. The optical responses of the grating under different parameters are analyzed by time domain finite difference method. The research shows that the resonance wavelength of the grating can be tuned by varying the height of air gap when the TM polarization incident wave is applied. Furthermore, the resonance wavelengths almost vary in a linear relation respect to the height of air gap. A narrow linewidth characteristic can be obtained by applying a shallow grating. The simulation results show that the wavelength can be tuned from 1 515 to 1 558 nm with the FWHM less than 0.6 nm.

**Key words:** Grating; Guided mode resonance; Narrowband; Filter; Tunable

**OCIS Codes:** 230.7408; 050.2770; 130.2790

## 0 引言

导模共振效应是出现在亚波长光栅结构中的一种异常衍射现象,该效应具有较窄的带宽、高衍射效率、

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 11404388, 61475188, 61675231, 61635013, 61405243),中国科学院西部之光基金(No. XAB2015B26)和中国科学院战略性先导科技专项(B类)(No.XDB 24030600)资助

**第一作者:**黑徐伟(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为光通信与光信息技术. Email:18702907896@163.com

**导 师:**张文富(1982-),男,研究员,博士,主要研究方向为微纳光子器件研究. Email:wfuzhang@opt.ac.cn

**通讯作者:**王国玺(1987-),男,副研究员,博士,主要研究方向为微纳光子器件研究. wangguoxi@opt.cn

**收稿日期:**2017-03-07; **录用日期:**2017-06-02

<http://www.photon.ac.cn>

对波长或入射角等参数有很强的敏感性等特点.导模共振是指当满足严格的相位匹配条件时,外部的传播光波与受到波导调制的泄漏模之间耦合引起光波能量的重新分布.利用光栅结构的导模共振效应被用来实现包括窄线宽滤波器<sup>[1-2]</sup>、宽带激光腔反射器<sup>[3-5]</sup>、光开关<sup>[6]</sup>和光调制器<sup>[7]</sup>等光学元件.

在基于导模共振效应的滤波器设计中,通过对光栅结构进行设计实现各种高性能的滤波器件已经被广泛研究.Wang 和 Magnusson 通过引入等效介质理论和抗反射薄膜方法,实现了低旁带、对称线型的滤波器<sup>[8]</sup>.Magnusson 利用 TM 偏振的入射光以布儒斯特角入射时,菲涅尔反射系数为零这一特性设计了宽光谱响应的低旁带滤波器<sup>[9]</sup>.2010 年刘文兴等<sup>[10]</sup>分析了三层光栅结构中各层高度对共振谱线的影响,提出浅调制的亚波长光栅可实现超窄线宽滤波器.在导模共振滤波器的研究中,除了光谱特性优化以外,波长可调谐滤波器设计也受到广泛关注.2013 年 Mohammad 等<sup>[11]</sup>提出了通过热光调制的方法实现波长可调的导模共振滤波器,使用深刻蚀和浅刻蚀光栅分别实现了 15 和 12 nm 的波长可调范围.2015 年金崇君等<sup>[12]</sup>通过对多层光栅中空气间隙注入不同折射率的流体聚合物材料,改变光栅的有效折射率,从而实现宽度为 13.181 nm 的可调谐导模共振滤波器.

本文设计了一种分离的光栅结构,其波导层是两个介质波导被一个空气薄层隔开的多层结构.分析了该结构在 TM 偏振入射时的光谱特性.研究发现通过改变空气薄层的厚度可以实现对共振波长的可调(1 515~1 558 nm),且在可调谐范围始终保持较窄的线宽(<0.6 nm),这一特性使得该器件有望在全光网络通信的光复用、波长路由动态控制以及光放大器的噪声抑制中发挥重要作用.

## 1 基本原理

图 1 为双层亚波长光栅结构示意图,第一层是光栅层,第二层是波导层.根据等效介质理论可以将亚波长光栅层视为均匀介质波导,对于 TE/TM 偏振的平面波入射时,其等效折射率表示为<sup>[13]</sup>

$$n_{\text{eff}} = \begin{cases} [fn_{\text{IH}}^2 + (1-f)n_{\text{IL}}^2]^{1/2} & \text{TE} \\ \{n_{\text{IH}}^2 n_{\text{IL}}^2 / [fn_{\text{IL}}^2 + (1-f)n_{\text{IH}}^2]\}^{1/2} & \text{TM} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $f$  为填充因子, $n_{\text{IH}}$  和  $n_{\text{IL}}$  分别为光栅层高折射率和低折射率.对于多层波导结构其本征方程表示为

$$P_c A + P_c P_s B + C + P_s E = 0 \quad (2)$$

其中各参数的定义参考文献[13].

当某一级次的衍射波正好与波导所支持的某个模式相位匹配时,对应的入射光能量将耦合到这一模式当中,第  $j$  级衍射波将引起共振效应<sup>[14]</sup>,即

$$\beta_j = k(n_1 \sin \theta_0 - j\lambda/\Lambda) \quad (j = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (3)$$

式中  $\Lambda$  为光栅周期.联立式(1)、(2)、(3)可得光栅的共振波长.为了保证导模共振效应的发生,波导层的折射率必须大于入射介质和基底材料的折射率( $n_2 > n_c, n_s$ ).同时为了得到较好的滤波特性,应当使光栅层具有较高的空间频率从而保证只有零级透射波和反射波,而其他高级次的衍射波均为倏逝波.

由文献[10]可知对于亚波长光栅的光谱特性,其共振谱的线宽主要由光栅层的厚度来决定.波导所支持的泄漏模式的波失表示为

$$\beta_j = \beta_0 + i\gamma \quad (4)$$

其中虚部的  $\gamma$  代表耦合损耗.通常共振峰的谱线线宽是正比于耦合损耗,表示为

$$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = \lambda_0 \Delta\gamma/\pi \quad (5)$$

对于导模共振效应,入射光被光栅耦合的过程发生在光栅层与波导层的交接处<sup>[10]</sup>,根据耦合模式理论,随着光栅层厚度的减小耦合损耗减小,因此会得到更窄的线宽.计算图 1 所示的双层光栅结构的透射谱线,取光栅层材料的折射率分别为  $n_{\text{IH}} = 3.4, n_{\text{IL}} = 1$ ,波导层材料的折射率与光栅中高折射率材料相等,即  $n_{\text{IH}} = n_2$ .光栅周期为  $\Lambda = 814 \text{ nm}$ ,填充因子为  $f = 0.5$ ,波导层厚度为  $d_2 = 220 \text{ nm}$ ,基底的折射率为  $n_s = 1.46$ ,光

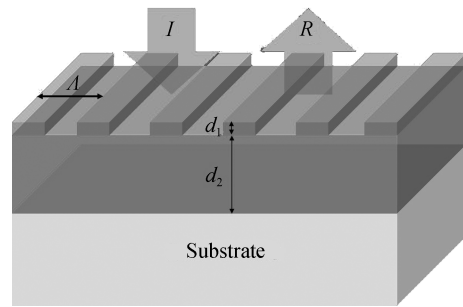


图 1 双层光栅结构示意图  
Fig.1 Structure of the double layers grating

栅厚度分别取为  $d_1=7, 10, 20$  nm. 本文均采用 TM 偏振的平面波垂直入射, 基底厚度假设足够大, 结果如图 2 所示, 光栅厚度  $d_1=7, 10, 20$  nm 共振波长分别为 1 496 nm、1 556 nm 和 1 573 nm, 半高全宽分别为 1.1 nm、2.4 nm 和 8 nm. 可以看到随着光栅厚度的增加, 谱线的线宽也越来越大.

根据前文的分析, 当光栅厚度减小, 耦合损耗也减小, 则光场可以在波导内发生多次谐振. 对不同光栅厚度时在共振波长处的场分布进行了计算, 结果如图 3. 可以看出当光栅厚度较窄时, 有较强的场分布在波导层、波导层和光栅层与基底的交接处, 而随着厚度的增加导致耦合损耗变大, 从而电场分布变弱. 这与前文耦合模式理论的分析相符合. 因此, 为了使滤波器获得较窄的线宽, 可以采用浅调制光栅结构.

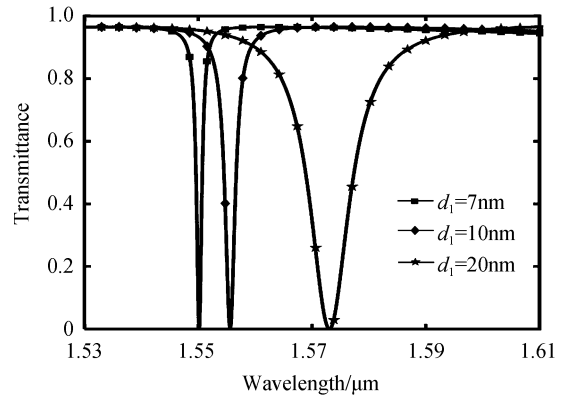


图 2 当  $d_1$  分别为 7 nm, 10 nm, 20 nm 时透射率与入射波长之间的关系

Fig.2 Transmittance vs. incident wavelength for  $d_1=7$  nm, 10 nm, 20 nm

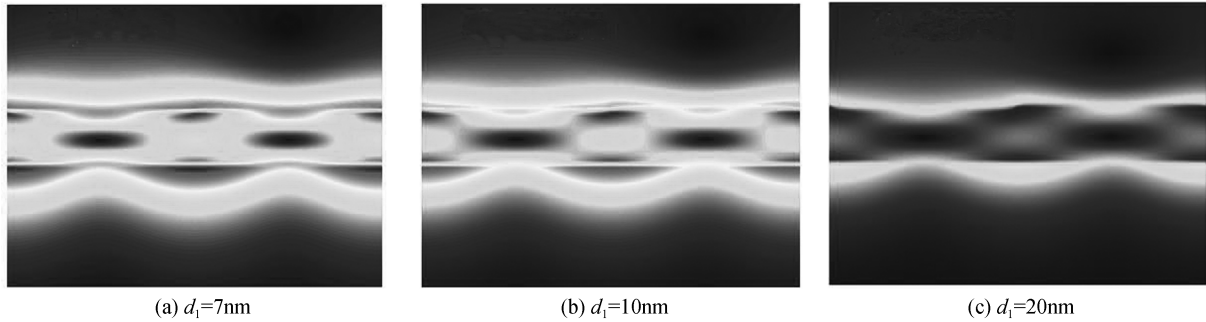


图 3  $d_1$  分别为 7 nm, 10 nm, 20 nm 时共振波长处的电场分布

Fig.3 Electricfield distribution on resonance wavelength for  $d_1=7$  nm, 10 nm, 20 nm

## 2 可调谐滤波器光谱特性分析

图 4 为本文研究的分离式亚波长光栅结构, 相比与图 1 所示的光栅结构, 其波导层被一层空气薄层隔开,  $d_s$  为空气薄层的厚度. 分别计算当  $d_s=5, 10, 15, 20, 25$  时的透射谱线,  $d_1=10$  nm,  $d_w=d_2/2=110$  nm, 其他参数与上节光栅结构相同, 结果如图 5.

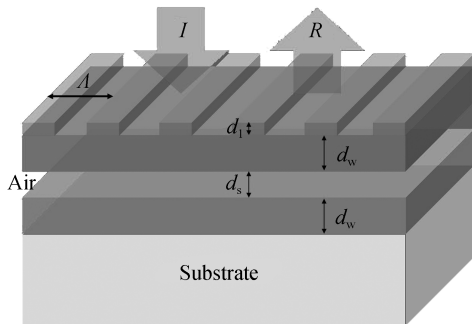


图 4 带空气间隙的光栅结构

Fig.4 Structure of the grating with air gap

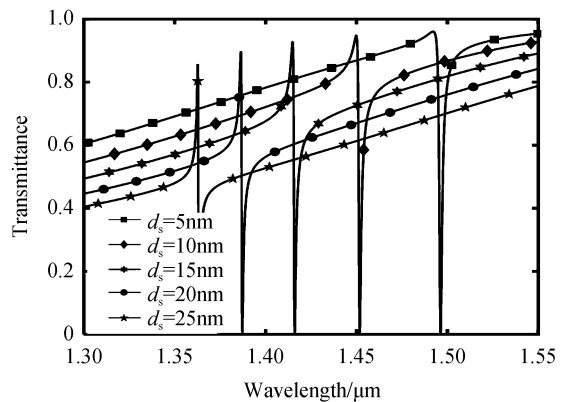


图 5 共振波长与空气间隙厚度的关系

Fig.5 Resonance wavelength vs. height of air gap

可以看到透射率曲线从  $d_s=0$  时的对称线型随着  $d_s$  的增大变为非对称线型, 旁带也随之增大. 这是因为空气薄层的加入对原本结构的共振产生影响. 虽然当  $d_s$  较大时的透射谱已经不能满足滤波的要求, 但是从图 5 可以明显看出, 空气薄层的厚度对共振的周期有调控作用. 随着  $d_s$  的增大共振波长向短波长方向发生偏

移.此时,由于空气间隙层的引入,该光栅的波导类似于 F-P 腔结构,腔长变化引起干涉条件发生改变,从而导致共振位置发生改变,这使得该结构实现对波长调谐成为可能.

为了获得较好的滤波特性,需要对光栅结构参数进行优化.此时选用浅调制光栅的设计,以得到较窄的透射峰,且对波导的周期等参数进行了优化,使其共振峰在 1 530 nm 通信波段附近,以满足其在通信波段应用的要求.具体的结构参数为:光栅周期  $\Lambda = 1\ 010\ \text{nm}$ ,光栅层厚度  $d_1 = 8\ \text{nm}$ ,两波导层厚度均为  $d_w = 95\ \text{nm}$ ,空气层厚度为  $d_s = 27\ \text{nm}$ .其透射谱线计算结构如图 6.优化后的透射谱线具有对称的线型,重要的是有较窄的半高全宽.其共振峰和半高全宽分别为 1 529 nm 和 0.5 nm.

对优化后的结构仍选取不同的  $d_w$  进行仿真,分析空气薄层的厚度对共振谱线的影响.如图 7 所示,当空气层的厚度从 10 nm 增加到 40 nm,共振波长从 1 576 nm 几乎线性的向短波长方向发生偏移直到 1 509 nm.

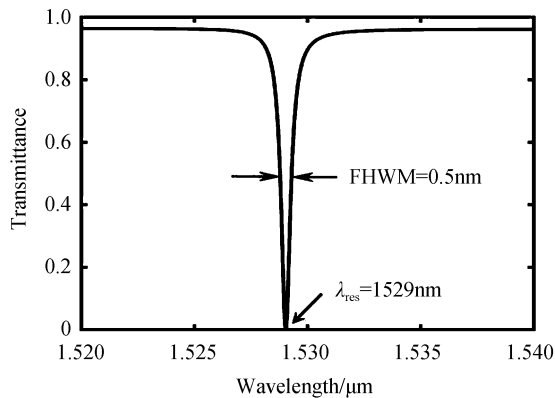


图 6 当  $d_s = 27\ \text{nm}$  时透射率与入射波长的关系

Fig.6 Transmittance vs. incident wavelength for  $d_s = 27\ \text{nm}$

当  $d_w$  分别为 10 nm, 15 nm, 20 nm, 25 nm, 30 nm, 35 nm, 40 nm 时,对应的透射谱也进行了计算,见图 8.其对应的谱线线宽分别为 0.58 nm, 0.55 nm, 0.53 nm, 0.47 nm, 0.45 nm, 0.43 nm, 0.44 nm,半高全宽基本保持在 0.5 nm 左右.同时透射谱的低边带特性也保持不变.然而可以看到,当  $d_w = 10\ \text{nm}$  时,共振谱线表现出非对称线型,且具有较大的旁带.当  $d_w = 40\ \text{nm}$  时,共振谱线也表现出明显的非对称线型.因此在该调谐范围内,由于谱线在两端表现出来的形状变化,仅有中间区域表现出较好的滤波特性.对  $d_w$  在 10~40 nm 的范围内进行了计算,结果表明在 15~35 nm 时,共振谱线表现出较好的线型,可以实现在波长范围为 1 515~1 558 nm 的可调谐滤波特性.

根据前面的研究可知,对于该分离的浅调制光栅结构,当空气薄层的厚度从 15 nm 逐渐增大到 35 nm 时,透射谱会发生蓝移,反射峰可调谐范围可达 43 nm,在该调谐范围内都可以得到窄线宽特性.微机电系统的梳齿驱动结构可实现精确位移控制<sup>[15]</sup>,利用该系统可以改变空气薄层的厚度,从而得到所需要的共振波长.

### 3 结论

根据严格耦合波理论和等效介质理论,讨论了双层光栅的导模共振效应,分析了光栅结构对共振谱线线宽的影响.通过利用浅调制光栅结构实现较小半高全宽的导模共振光栅结构.设计了一种分离的亚波长光栅结构,其波导层是由两个平板介质波导被空气薄层隔开而成.研究了空气间隔层的厚度对共振波长以及线宽的影响.结果表明,通过对空气间隔层厚度的控制可以实现在 1 515~1 558 nm 波长范围内的可调谐导模共

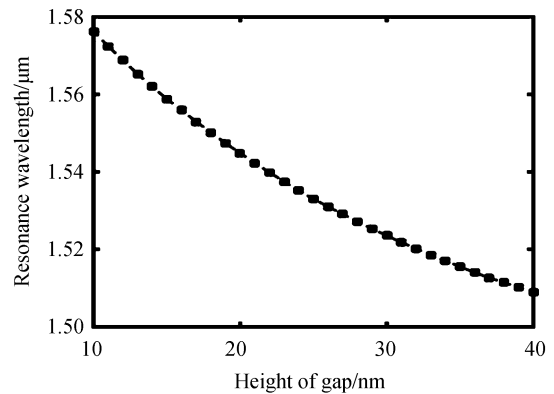


图 7 共振波长与空气间隙厚度的关系

Fig.7 Resonance wavelength vs. height of air gap

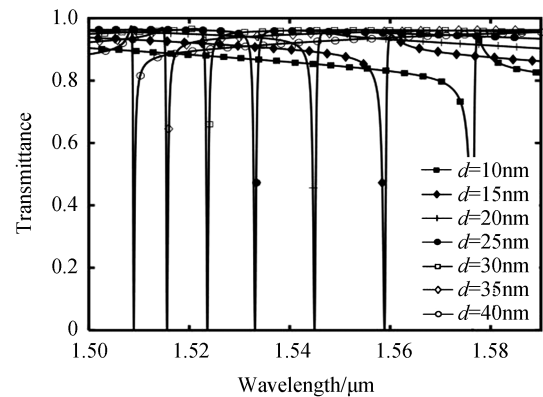


图 8 不同空气间隙层厚度时透射率与入射波长的关系

Fig.8 Transmittance vs. incident wavelength for various height of air gap

振滤波器,在整个波长调谐范围内,保持较窄的半高全宽( $<0.6$  nm).该结构的可调谐、窄线宽等滤波特性使其能够在光通信等领域发挥重要用途;不仅如此,该结构还可对一定压力进行探测、传感等,当外界压力改变空气间隙的厚度时根据共振峰的漂移情况得出压力大小.

#### 参考文献

- [1] MAGNUSSON R. New principle for optical filters[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, **61**(9): 1022-1024.
- [2] LIU Z S, TIBULEAC S, SHIN D, *et al.* High-efficiency guided-mode resonance filter.[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(19): 1556-1558.
- [3] 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**(2): 119-122..
- [4] BRÜCKNER F, FRIEDRICH D, CLAUSNITZER T, *et al.* Realization of a monolithic high-reflectivity cavity mirror from a single silicon crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(16): 163903.
- [5] KONTIO J M, SIMONEN J, LEINONEN K, *et al.* Broadband infrared mirror using guided-mode resonance in a subwavelength germanium grating[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(15): 2564-2566.
- [6] MIZUTANI A. Numerical study on an asymmetric guided-mode resonant grating with a Kerr medium for optical switching.[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, **22**(2): 355-360.
- [7] KATCHALSKI T, LEVY-YURISTA G, FRIESEM A, *et al.* Light modulation with electro-optic polymer-based resonant grating waveguide structures.[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(12): 4645-4650.
- [8] WANGS S, MAGNUSSON R. Design of waveguide-grating filters with symmetrical line shapes and low sidebands.[J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(12): 919-921.
- [9] MAGNUSSON R, SHIN D, LIU Z S. Guided-mode resonance Brewster filter.[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(8): 612-614.
- [10] LIUW, LAI Z, GUO H, *et al.* Guided-mode resonance filters with shallow grating.[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(6): 865-867.
- [11] UDDINM J, MAGNUSSON R. Guided-mode resonant thermo-optic tunable filters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(15): 1412-1415.
- [12] XIAO G, ZHU Q, SHEN Y, *et al.* A tunable submicro-optofluidic polymer filter based on guided-mode resonance[J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(8): 3429-3434.
- [13] WANG S S, MAGNUSSON R. Multilayer waveguide-grating filters.[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(34): 2414-2420.
- [14] WU De-chang, YANG Shu. Double-sided T-shaped-disk waveguide filters based on plasmon-induced transparency[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(10): 1287-1291.  
吴德昌, 杨树. 等离子体诱导透明的 T 形-圆形波导滤波器[J]. *发光学报*, 2016, **37**(10): 1287-1291.
- [15] MAGNUSSON R, DING Y. MEMS tunable resonant leaky mode filters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(14): 1479-1481.