

文章编号: 0258-7025(2010)04-0950-04

方位角调谐的反射窄带导模共振滤光片设计

张大伟 王琦 朱亦鸣 黄元申 倪争技 庄松林

(上海理工大学上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘要 调谐反射窄带滤光片在光通信、显示、光开关和防伪等领域有重要应用。导模共振滤光片(GMRF)对结构参数非常敏感,因此可通过结构参数的变化来实现反射峰值的调谐。为了研究利用方位角的变化来实现导模共振滤光片调谐的新方法,分析了方位角对导模共振滤光片衍射区域电场分布的影响,通过严格的耦合波理论计算,设计了方位角调谐的导模共振滤光片。对于 60° 入射的 TM 偏振光,随着方位角的增加,导模共振滤光片的共振峰值向长波方向移动。

关键词 光栅;导模共振;调谐;方位角;滤光片

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.0950

Design of Guided Mode Resonant Filters Tuned by Azimuthal Angle

Zhang Dawei Wang Qi Zhu Yiming Huang Yuanshen Ni Zhengji Zhuang Songlin

(Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract Tunable reflective narrow filters have important applications in optical communication, display, optical switch, security images label and other fields. The design of narrow tunable reflective guided mode resonant filters (GMRF) using the variation of azimuthal angles was done. Through rigorous coupled-wave analysis, the structure of guided mode resonant filters whose reflective peak value depend on the azimuthal angle was obtained. For TM polarize light with 60° incident angle, the resonant peak value of guided mode resonant filters shifted to longer wavelength with the increase of azimuthal angles.

Key words gratings; guided mode resonant; tunable; azimuthal angle; filters

1 引 言

中心峰值可调谐的反射窄带滤光片在光通信^[1,2]、显示^[3,4]、光开关^[5]和防伪^[6]等领域有重要应用。导模共振滤光片(GMRF)是典型的反射窄带滤光片^[7~9],由于导模共振对器件的结构参数(光栅周期、厚度、占空比、折射率等)非常敏感,运用这种敏感性,可以实现共振波长调谐。实现反射窄带滤光片中心峰值调谐的方法有多种^[10~16],例如Niederer等^[11]通过改变入射角的办法实现了导模共振波长 1526~1573 nm 的调谐;Dudovich等^[12]提出了通过电场改变亚波长光栅半导体材料的办法来调谐共振波长的方法,实现了 0~0.8 nm 范围内

的共振波长调谐;Fuchyi Yang等^[13,14]通过在导模共振滤光片上构建液晶盒,通过外加电压电控调节液晶的折射率的方法实现了 25 nm 的可调反射共振波长。本文运用严格的耦合波理论,通过分析方位角对导模共振效应的控制作用,提出了一种新的运用方位角变化来实现导模共振滤光片中心峰值调谐的方法,实现了共振波长 342~608 nm 的调谐。

2 方位角对导模共振效应的影响

对于某些特定结构的亚波长光栅结构器件,当高级次衍射光场与波导所支持的导模相位匹配的时候,会出现反射带宽非常窄的共振峰,这种现象称为导模

收稿日期: 2009-07-16; 收到修改稿日期: 2009-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(60908021)、国家科技支撑计划(2006BAK03A03),上海市科委课题(09QA1404200, 08DZ2272800 和 08ZR1415400)资助课题。

作者简介: 张大伟(1977—),男,博士,副教授,主要从事微纳光学器件和工程等方面的研究。

E-mail: usstoe@163.com

共振效应。导模共振效应与方位角(入射光所在的入射平面与光栅槽的夹角,如图 1 所示的 ϕ 角)密切相关,特别是对于某些特定结构的导模共振滤光片。

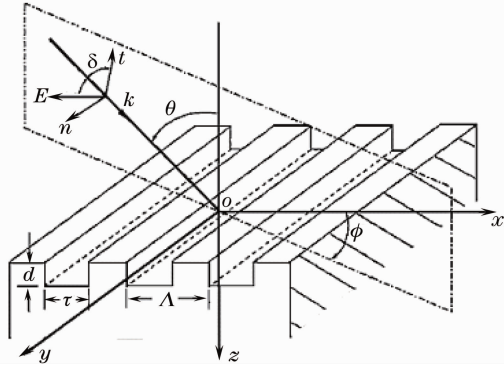


图 1 光栅结构入射光线与方位角示意图

Fig. 1 Geometry for the grating diffraction problem analyzed herein

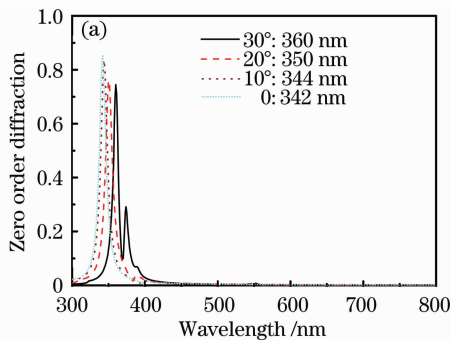
图 1 中 θ 为入射角, ϕ 为方位角, d 为光栅槽深。当方位角不是 0 或 90° 时,导模共振滤光片产生圆锥衍射,即各个衍射级次不在一个平面上,而是分布在一个圆锥面上。在 $z < 0$ 的衍射区域,电场的归一化解为

$$E_i = E_{\text{inc}} + \sum_i \mathbf{R}_i \exp[-j(k_{ix}x + k_{iy}y - k_{iz}z)], \quad (1)$$

式中

$$k_{xi} = k_0 [n_1 \sin \theta \cos \phi - i(\lambda_0 / \Lambda)], \quad (2)$$

E_i 为入射媒质的电场, E_{inc} 为入射电场, \mathbf{R}_i 为归一化



的第 i 级反射波的复振幅矢量, k_{xi} 为波矢分量, Λ 为光栅周期。

(2)式表明,方位角 ϕ 会直接影响 $z < 0$ 的衍射区域电场分布。因此,通过变化方位角,可以实现对衍射区域电场分布的控制,达到共振峰值调谐的目的。

3 方位角调谐的导模共振滤光片设计

图 2 为运用耦合波理论设计的单层导模共振滤光片结构,基底层是折射率为 1.46 的石英材料,光栅层包含两种光学材料,折射率分别为 2 和 1.46。光栅周期为 500 nm, 占空比为 0.5, 槽深为 150 nm。

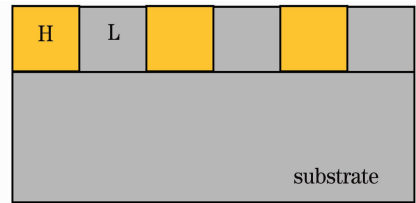


图 2 单层导模共振滤光片结构

Fig. 2 Structure of single-layer GMRF

图 3(a)给出了对于 60° 入射的 TM 偏振光,导模共振滤光片在方位角分别为 $0, 10^\circ, 20^\circ$ 和 30° 时的 0 级衍射光谱。从图 3(a)可以看出,在方位角分别为 $0, 10^\circ, 20^\circ$ 和 30° 时,导模共振滤光片的共振峰值分别对应 342, 344, 350 和 360 nm。随着方位角的增加,共振峰向长波方向移动。

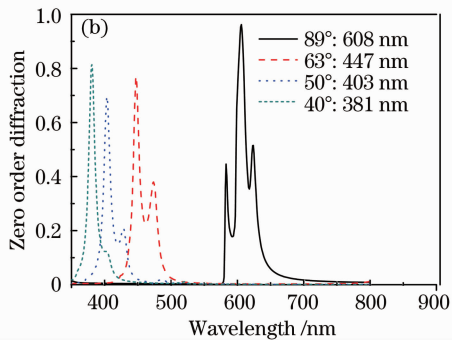


图 3 导模共振滤光片在不同方位角时的 0 级衍射光谱

Fig. 3 Zero order diffraction efficiency of guided mode resonant filters with different azimuthal angles

图 3(b)给出了相同条件下,导模共振滤光片在方位角分别为 $40^\circ, 50^\circ, 63^\circ$ 和 89° 时的 0 级衍射光谱。从图 3(b)可以看出,在方位角分别为 $40^\circ, 50^\circ, 63^\circ$ 和 89° 时,导模共振滤光片的共振峰值分别对应 381, 403, 447 和 608 nm。随着方位角的增加,共振峰依然向长波方向移动。但与图 3(a)不同的是,图 3(b)中随着方位角的增加,共振峰的形状发生了劣化。如方位角为 89° 时共振峰值 608 nm 附近出现

了 2 个次共振峰(583 和 623 nm)。另外,需要说明的是,在该滤光片设计计算的时候,发现当方位角为 60° 和 90° 时,滤光片并不呈现导模共振现象,因此选取了 63° 和 89° 这两个方位角。共振峰形状的劣化以及某些方位角下滤光片并不呈现导模共振效应的现象,说明导模共振效应对导模共振结构和参数,特别是方位角参数非常敏感。

图 3(a), (b) 都给出了随着方位角的变化导模

共振滤光片的共振峰值的变化情况。需要指出的是,在本设计中,只分析和利用 0 级衍射波。除了 0 级衍射波共振峰值相对高的因素以外,还因为其他衍射级次的衍射方向会因为方位角的改变而在一个圆锥面上变化,如果利用这些衍射级次的衍射波,则衍射方向的改变会导致检测等一系列后续部分元件位置的移动,从而给系统带来复杂性和操作困难等缺点。而 0 级衍射波,则会始终与入射光线同在入射面上,不存在这一问题。

4 分析和讨论

图 4 给出了方位角和共振峰值之间的依赖关系,从图 4 可以看出,共振峰值并不随方位角的增加而线性正比增加。而且,并不是所有的方位角都对应一个共振峰值。因此,运用方位角来调谐导模共振滤光片中心反射峰值时,需要精确控制导模共振滤光片的方位角角度。这种精确控制方位角的要求增加了实际使用中的复杂程度。

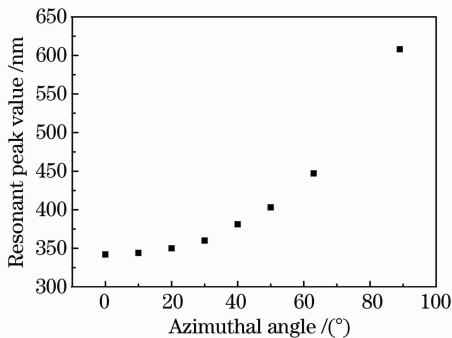


图 4 导模共振峰值随方位角的变化关系

Fig. 4 Dependence of resonant peak value with azimuthal angles

需要说明的是,共振峰值可以随方位角变化而变化的特性并不是单层导模共振滤光片的普遍特性,只有特定参数的单层导模共振滤光片才具备该特性,也就是说,图 2 所给出的结构是优化过的结构。对图 2 所示的单层导模共振滤光片结构的参数进行了变化,同样进行了计算和分析,发现并不是所有参数的单层导模共振滤光片结构均具备方位角调谐特性。图 5 是当光栅层的材料折射率分别为 1.95 和 1.46,光栅周期为 500 nm,槽深 120 nm,占空比为 0.3 时,对于 45°入射的 TM 偏振光,导模共振滤光片在方位角为 0°,10°,20°和 30°时的 0 级衍射光谱。可以看出该参数下的单层导模共振滤光片共振峰的反射率非常低,且变化方位角时,反射率变化较大,其反射峰值并不具备提出的方位角调谐特性。

这也进一步说明,该类单层导模共振滤光片的衍射光谱对结构参数非常敏感,作为调谐滤光片使用时,要进行结构参数的优化。

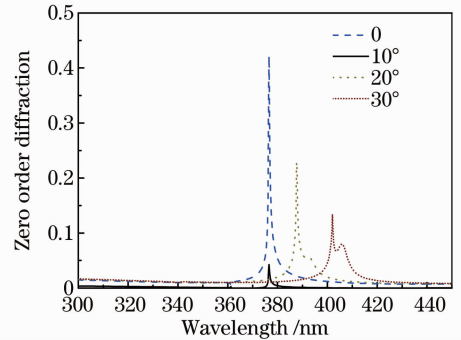


图 5 结构参数变化的导模共振滤光片在不同方位角时的 0 级衍射光谱

Fig. 5 Zero order diffraction efficiency of structure-changed guided mode resonant filters with different azimuthal angles

5 结 论

结合方位角对导模共振效应的影响分析,运用耦合波理论设计了通过方位角的变化来调谐共振峰值的单层导模共振滤光片。所设计的结构对于 60°入射 TM 偏振光,随着方位角的增加,共振峰值向长波方向移动,从 0°对应的 342 nm 增加到 89°对应的 608 nm。该类调谐滤光片具有带宽窄、调谐方法简单等优点,非常适用于微纳光学系统,但其存在着对方位角控制精度要求高,并且共振峰值不随调谐量线性正比的问题。在后面的工作中,将继续研究和制备通过方位角变化来调谐共振峰值的导模共振滤光片,以期推动新型调谐滤光片的研究和应用。

参 考 文 献

- R. Gamble, P. H. Lissberger. Reflection filter multilayers of metallic and dielectric thin films[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(14): 2838~2846
- T. Augustsson. Proposal of a DMUX with a Fabry-Perot all-reflection filter-based MMIMI configuration[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(3): 215~217
- M. Q. Tan, Y. C. Lin, D. Z. Zhao. Reflection filter with high reflectivity and narrow bandwidth [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4): 827~830
- Z. Li, P. Desai, R. Akins *et al.*. Electrically tunable color for full-color reflective displays[C]. *SPIE*, 2002, **4658**: 7~13
- A. Sharon, D. Rosenblatt, A. A. Friesem *et al.*. Light modulation with resonant grating-waveguide structures[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1564~1566
- Dawei Zhang, Limeng Yuan, Jiabi Chen *et al.*. Design of guided mode resonant filters for authentication applications through azimuthal angles varying [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 776~778
- R. Magnusson, S. S. Wang. New principle for optical filters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(9): 1022~1024

- 8 Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Reflection spectra properties of guided-mode resonance filters with buffer layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1425~1428
王振华, 吴永刚, 桑田等. 带缓冲层的导模共振滤光片反射光谱特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1425~1428
- 9 Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Impact of buffer layer on cut-off properties of reflection spectra for guided-mode resonance filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 849~852
王振华, 吴永刚, 桑田等. 缓冲层对导模共振滤光片反射光谱截止特性的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 849~852
- 10 R. Magnusson, Y. Ding. MEMS tunable resonant leaky mode filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(14): 1479~1481
- 11 G. Niederer, H. P. Herzig, J. Shamir *et al.*. Tunable, oblique incidence resonant grating filter for telecommunications [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(8): 1683~1694
- 12 N. Dudovich, G. Levy-Yurista, A. Sharon *et al.*. Active semiconductor-based grating waveguide structures[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(8): 1030~1039
- 13 Fuchyi Yang, Gary Yen, Brian T. Cunningham. Voltage-tuned resonant reflectance optical filter for visible wavelengths fabricated by nanoreplica molding[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 261109
- 14 Fuchyi Yang, Gary Yen, Gilles Rasigade *et al.*. Optically tuned resonant optical reflectance filter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**: 091115
- 15 Cao Changsheng, Luo Bin, Pan Wei *et al.*. A linear tuning filter based on thin-film interference filters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1055~1058
曹昌盛, 罗斌, 潘炜等. 基于薄膜干涉滤光片的线性调谐激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1055~1058
- 16 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu *et al.*. Design and research of facular-shaping on the angle-tuned filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1375~1379
俞侃, 刘文, 黄德修等. 角度调谐滤光片光斑整形设计与实验[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1375~1379

《中国激光》“激光分子影像诊断与治疗监控”专题 征 稿 启 事

随着光学成像技术、分子标记技术和基因组学/蛋白质组学的发展,激光分子影像已经成为光子学技术与生命科学和医学应用交叉的关键技术科学,发展十分迅猛。激光分子影像可在细胞和分子层面探索生命最小基本单元的功能、疾病发生发展的分子机理,可为疾病的早期诊断及其治疗进行无创、实时、靶向性的检测和监控提供有效手段;有望解决长期困扰人类健康与发展的重大关键难题,从而有效改善人类生存与生活质量。《中国激光》计划于**2010年10月正刊**(EI核心收录)上推出“激光分子影像诊断与治疗监控”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光分子影像诊断与治疗监控”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

光学分子成像的新技术与新方法:主要包括荧光分子成像技术(FRET、FRAP、FCS等);光声成像(PAI);光学相干层析成像(OCT);激光散斑成像(LSI);微波热声成像(TAI);近红外光学漫射成像(DOT)以及太赫兹成像(THz)等。

光学分子探针与分子诊断:主要包括近红外高效光学分子探针;多模态复合纳米探针;蛋白质和多肽小分子光学探针;分子水平诊断光谱学研究(荧光、吸收、偏振和拉曼光谱等)以及基于纳米技术的高效基因检测、单分子识别等。

光学分子成像在疾病早期诊断和治疗监控中的应用:主要包括疾病早期诊断中的基础研究;肿瘤的光热、光化学治疗及其监控;低强度光子治疗技术及其机制;手术过程中的光学导航以及预后的无损伤光子学疗效评估与检测技术等。

特邀组稿专家:

邢达教授 华南师范大学

截稿日期:2010年6月30日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“激光分子影像诊断与治疗监控”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话: 021-69918427。