

Bragg反射齿型平面凹面衍射光栅性能研究

李宝 杜炳政 朱京平[†]

(西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

(2014年11月29日收到; 2015年1月29日收到修改稿)

本文基于Bragg反射光栅是一维光子晶体的一种特例结构, 提出利用一维光子晶体理论进行Bragg衍射光栅的设计并对其性能进行研究分析. 根据一维光子晶体理论, 建立了罗兰圆结构的凹面椭圆Bragg蚀刻衍射光栅, 研究了TE/TM模式下器件的分光特性以及入射角度改变对器件角色散造成的影响; 同时, 文中对比了空气介质型和金属铝线型椭圆Bragg蚀刻衍射光栅的光学性能. 研究表明: 选择合适的器件参数, 可以实现TE/TM模式下1.465—1.615 μm 范围内波长衍射效率在95%以上, 且空气介质型结构光栅的通道均匀性要优于金属铝线型结构光栅; 入射角在 30° — 60° 范围内变化时, 相同入射角度下, TM模式下器件角色散大于TE模式. 基于Bragg衍射光栅设计的波分复用器是一种尺寸小、衍射效率高的新型EDG波分复用器, 为未来密集型EDG波分复用器发展提供了一种新的设计思路.

关键词: 1-D光子晶体, Bragg蚀刻衍射光栅, 衍射效率, 波分复用**PACS:** 42.79.Dj, 42.40.Lx**DOI:** 10.7498/aps.64.154211

1 引言

随着信息时代的到来, 人们对通信容量的需求也愈来愈大, 尤其是传输如此海量的信息, 必然要占用越来越大的通信带宽. 根据预测, 未来25年中人们对通信带宽的需求将以每年三倍的速度增长, 波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术的出现满足了这种需求. 通过实际应用, WDM技术已经被证明是目前大容量、长途光传送网的最佳选择. 实现WDM的核心器件之一是光波分复用器, 主流的波分复用器件是平面波导型波分复用器, 包括阵列波导型(arrayed waveguide grating, AWG)^[1]和凹面蚀刻衍射光栅型(concave etched diffraction grating, CEDG)^[2]. 相比于大尺寸型波分复用器件, 它们具有尺寸小, 成本低, 高稳定性和易于操作等多方面的优势.

从某种程度上讲, CEDG和AWG存在部分共同点, 但这两种器件的光栅结构完全不同. CEDG采用深刻蚀衍射光栅, 光栅齿面并镀有金属反射膜, 而AWG采用的是阵列波导型光栅. 在器件尺

寸上, CEDG比AWG结构更加紧凑; 在加工工艺上, 由于CEDG光栅齿面需要进行深刻蚀, 所以对制作工艺要求较高, 为优化深刻蚀衍射光栅型器件的设计, 降低工艺难度, 改善器件的光学性能, 国内外学者在如何降低CEDG型光栅器件插入损耗、提高器件衍射效率等方面进行了深入的研究. 1997年Erickson等^[3]提出了全内反射型光栅齿面结构, 通过改变反射面结构降低菲涅耳反射损耗, 实现了中心波长1550 nm附近59.6%左右的衍射效率; 1998年, 加拿大国家研究院微结构科学研究所Jian-Jun He^[4]深入分析了EDG的光栅齿面特性, 发现刻蚀光栅的齿面平滑度、刻蚀深度与光栅角的垂直度是影响EDG散射损耗的主要因素; 2004年国内浙江大学的宋军等研究发现光栅齿的刻蚀顶角与底角误差会影响器件的插入损耗; 2008年, 比利时根特大学的Brouckaert等^[5]人提出用Bragg反射光栅代替深刻蚀光栅制成了1550 nm波段、尺寸为 $280\text{ }\mu\text{m} \times 150\text{ }\mu\text{m}$ 的波分复用器, 器件损耗为1.9 dB; 2012年加拿大肯高迪亚大学的Pottier等^[6]对椭圆型Bragg反射光栅波分复用器进行了理论研究, 结果表明Bragg反射光栅型结构

[†] 通信作者. E-mail: jpzhu@mail.xjtu.edu.cn

可有效降低器件插入损耗、提高 CEDG 型波分复用器的衍射效率,但在 Bragg 反射光栅的设计过程中其采用了多层介质膜理论,光栅的衍射频带出现了明显偏移.

目前,对 Bragg 反射光栅型波分复用器的设计主要是利用多层介质膜理论确定 Bragg 反射光栅的结构参数,但是这种方法确定的 Bragg 光栅反射频带不够准确,尤其是在非垂直入射情况下,反射频带波长漂移较严重.由于 Bragg 反射光栅在结构理论上是 1-D 光子晶体的一种特例,本文利用 1-D 光子晶体的带隙理论指导 Bragg 反射光栅设计,研究了 TE/TM 模式下空气型 Bragg 结构光栅与金属线型 Bragg 结构光栅器件的分光特性以及入射角度改变对器件色散造成的影响.该种 Bragg 衍射光栅结构是一种尺寸小、衍射效率高的新型 CEDG 分光结构,将为未来密集型蚀刻衍射光栅的发展提供一种新的设计思路,在光通讯、光谱仪设计和集成光学领域具有重要应用价值.

2 光栅设计原理

为实现光栅衍射的功能,入射光必须同时满足光栅方程和 Bragg 条件, Bragg 光栅多层介质膜的

衍射原理如图 1 所示.

折射率 n_2 的多层介质膜位于折射率为 n_1 的平面波导中.衍射光栅周期为 a , Bragg 反射光栅周期为 d , 光栅闪耀角 θ , Bragg 反射光栅中折射率 n_1 材料厚度为 d_1 , 折射率 n_2 材料厚度为 d_2 , 并且 d_1, d_2 满足 $d = d_1 + d_2$.

Bragg 蚀刻衍射型波分复用器的核心结构是 Bragg 反射光栅,目前 Bragg 反射光栅的结构设计一般是根据多层介质膜理论^[7]实现的,但这种设计方法存在一定的不准确性,因为只有当入射光在垂直入射时才能严格满足 Bragg 衍射条件,器件的衍射效率才能最大,这就限制了 Bragg 反射光栅的设计使用.由于多层介质膜在结构上是 1-D 光子晶体的一种特例,为此利用 1-D 光子晶体的带隙理论,确定出多层介质膜的厚度,并进一步得到 Bragg 光栅的反射带.

根据 1-D 光子晶体的能带理论,角度 θ 入射时,存在相应的最小截止频率 $\bar{\omega}_l$ 和最大截止频率 $\bar{\omega}_h$,如图 2 所示.波长 λ 可以表示为归一化频率 $\bar{\omega}$ ^[8,9]与 Bragg 光栅周期 d 的关系($\bar{\omega} = d/\lambda$),将传统光栅方程由 (1) 式化为 (2) 式,和差化积最终得到光栅衍射级次 m 与归一化频率 $\bar{\omega}$ 之间的关系 (3) 式.

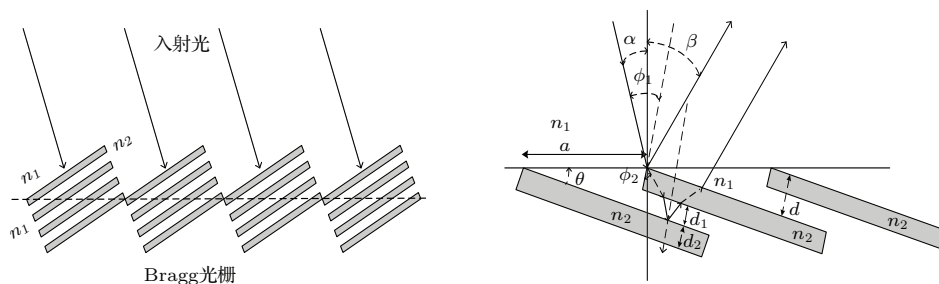


图 1 Bragg 光栅衍射原理图

Fig. 1. Schematic of the Bragg diffraction grating.

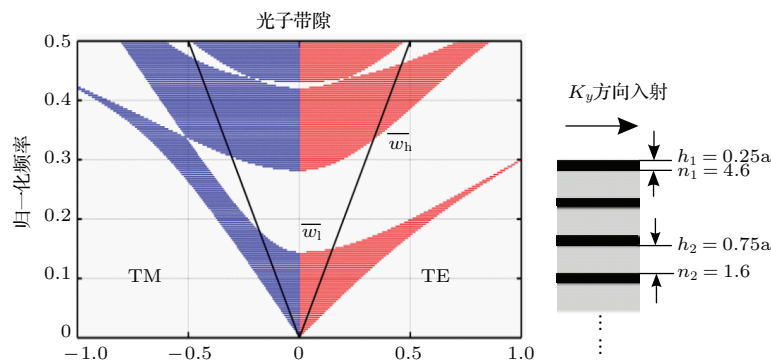


图 2 1-D 光子晶体结构及能带图

Fig. 2. Schematic of the 1-D photonic crystal structure and projected band structure.

$$m\lambda_0 = n_{\text{eff}} \cdot a \cdot (\sin \alpha + \sin \beta), \quad (1)$$

$$m \frac{d}{\bar{\omega}} = n_{\text{eff}} \cdot \frac{N \cdot d}{\sin \theta} \cdot (\sin \alpha + \sin \beta), \quad (2)$$

$$m = 2n_{\text{eff}} \cdot N \cdot \cos \phi \cdot \bar{\omega}, \quad (3)$$

其中, 中心波长 $\lambda_0 = \frac{d(\bar{w}_l + \bar{w}_h)}{\bar{w}_l \cdot \bar{w}_h}$. 通过 1-D 光子晶体能带理论计算, 确定合适的 Bragg 反射光栅结构参数, 从而根据光栅方程进一步得到光栅参数.

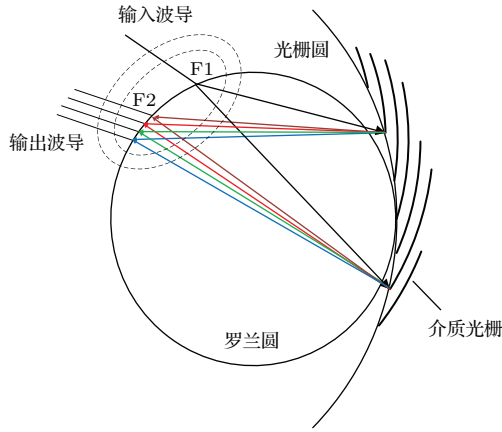


图3 椭圆型 Bragg 光栅结构原理图

Fig. 3. Schematic of elliptical Bragg grating structure.

将 Bragg 反射光栅引入波分复用器设计中主要有两种结构形式: 1) 直接在深刻蚀的阶梯光栅齿面后由 Bragg 反射光栅代替金属反射镀膜; 2) 用浅刻蚀的 Bragg 反射光栅介质条代替传统深刻蚀阶梯光栅. 本文主要讨论后者, 浅刻蚀 Bragg 蚀刻衍射光栅^[10]的设计主要基于罗兰圆结构如图 3 所示, 输入、输出波导位于半径为 R_{rc} 的圆上, 刻蚀的 Bragg 光栅介质条端点位于半径是 $2R_{\text{rc}}$ 的光栅圆上, 介质条位于焦点是 F1, F2 两点的椭圆上, F1 为输入端点, 从 F1 点引入的光波, 经过自由传输区传播, 并在椭圆 Bragg 光栅上发生衍射, 由于罗兰圆结构同时具有色散和会聚的功能, 不同频率的光被衍射到输出端 F2 点, 并通过相应的输出波导会聚输出, 实现对输入波长的解复用.

3 仿真结果与分析

传统阶梯型蚀刻衍射光栅主要采用刻蚀光栅齿面后镀金属膜^[11]的方式来增加光栅的衍射效率. 针对 Bragg 蚀刻衍射光栅型结构我们同样对比了金属介质光栅齿面与空气介质光栅齿面对器件光学性能产生的影响.

3.1 Bragg 反射光栅衍射特性

以二氧化硅为平板波导材料, 选择空气和 Al 分别作为 Bragg 光栅齿面结构, 其中 $n_{\text{SiO}_2} = 1.5$, $n_{\text{air}} = 1$. 取中心波长 $\lambda = 1.550 \mu\text{m}$, 衍射级次 $m = 2$. 分别在 FDTD solution 中建立罗兰圆结构的椭圆 Bragg 光栅仿真模型如图 4.

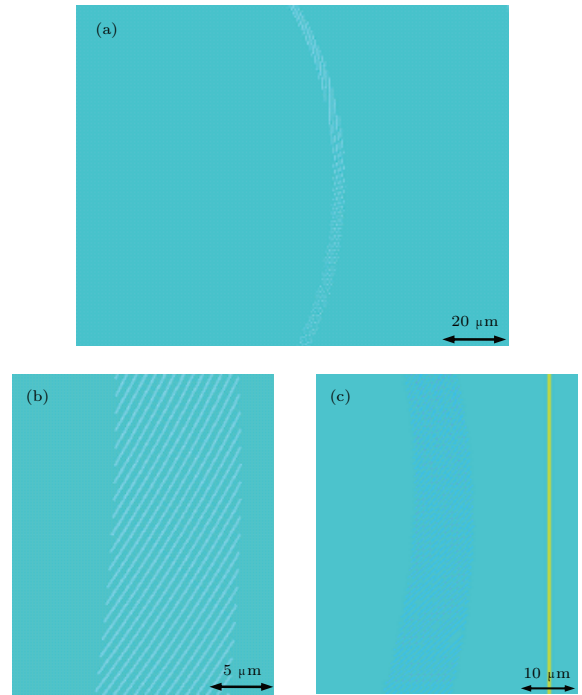


图4 (a) FDTD solution 中罗兰圆结构 Bragg 衍射光栅模型; (b) 空气介质型 Bragg 光栅; (c) Al 介质型 Bragg 光栅

Fig. 4. (a) The Rowland circle Bragg diffraction grating structure model established in FDTD solution; (b) air dielectric type Bragg grating; (c) Al metallic line type Bragg grating.

表1 椭圆型 Bragg EDG 结构参数

Table. 1. Parameters of the elliptical Bragg EDG structure.

入射角/(°)	闪耀角/(°)	光栅周期/ μm	SiO ₂ 厚度/ μm	Air 厚度/ μm	光栅圆半径/ μm	罗兰圆半径/ μm
45	37.5	1925.2	787.8	384.2	200	100

图5是1-D光子晶体反射率(z)关于归一化频率(x)和 SiO_2 介质占空比(y)的三维谱图,从图上可以看出,在 SiO_2 占空比为0.6722时,所选频段可以实现衍射效率80%以上.图6是相应光栅设计参数下,1-D光子晶体能带图,其中黑色部分表示全方向反射禁带.根据第1部分中介绍的1-D光子晶体能带理论,从光子晶体能带图5、图6中得到归一化频率 $\bar{\omega}_l$, $\bar{\omega}_h$,进一步计算出Bragg光栅的反射禁带为1.4560—1.6445 μm .

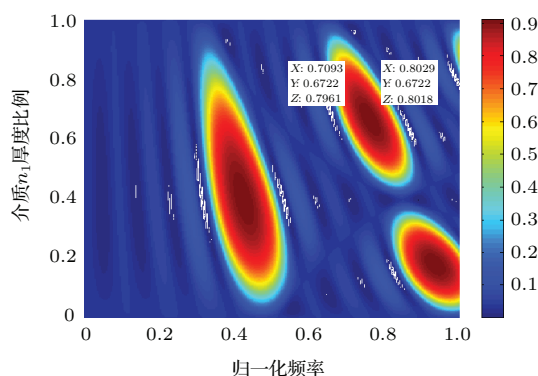


图5 1-D光子晶体反射率(z)关于归一化频率(x)和介质占空比(y)的三维谱图

Fig. 5. The relationship of reflection efficiency (z), normalized frequency (x) and normalized thickness ratio (y), the red areas are high reflection region.

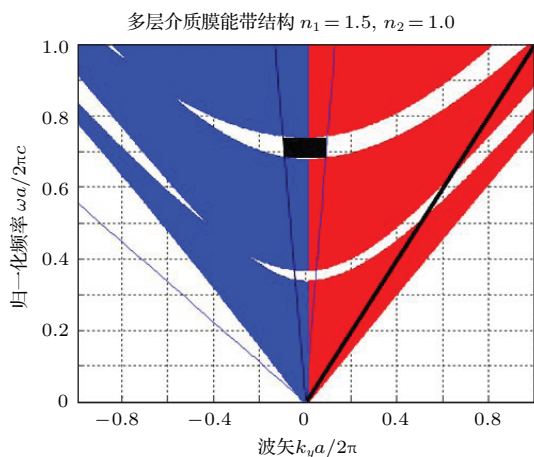


图6 Bragg光栅光子晶体带隙图

Fig. 6. The photonic crystal band gap of Bragg grating.

图7是TE/TM入射光模式下空气型介质光栅的输出谱线,从图上可以看出选择合适的器件参数,可以使空气介质型光栅实现TM模式下,1.465—1.615 μm 波长范围内衍射效率达到96%左右,其他衍射级次会得到明显抑制.尽管该结构的

设计只是一种理论上的模型,但该种空气型介质光栅结构可以明显提高器件的衍射效率.分析小部分能量损耗的原因,介质光栅刻蚀齿面位置的微小移动造成的误差会引起能量的损耗.此外,通过增加罗兰圆的半径,选择合适的材料比以及限制入射光束的发散度,可以进一步提高光栅的衍射效率.

利用光栅衍射的近场分布,通过傅里叶变换可以得到光栅衍射的远场^[12,13]光强分布,并以此分析器件结构的衍射分光特性.

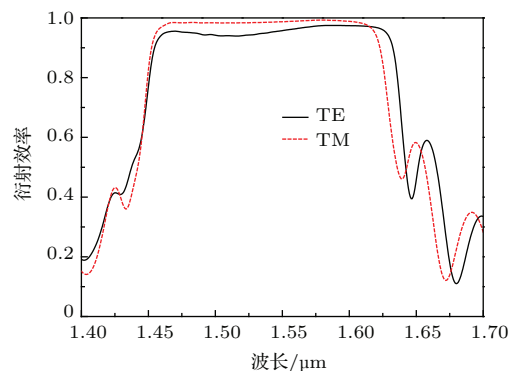


图7 TE/TM偏振模式空气介质光栅输出谱线

Fig. 7. Output spectrum of the air dielectric type grating for TE/TM polarization.

从光场分布图8中可以看出,对于相同的入射波段,空气型椭圆Bragg光栅存在一定的反射带宽,实现了对一维光子晶体禁带内的波长衍射,相应的波长衍射到了一个固定的角度,不存在其他方向的衍射或者不存在多级次的衍射,因此实现了对入射波段的高效衍射;而对于金属Al线型椭圆Bragg光栅,从衍射场图上可以看出,衍射不存在禁带,可实现全波段的反射,但是光波出现了两个衍射方向,说明对应衍射级次的光衍射效率降低了.

对比于空气介质型椭圆Bragg衍射光栅,金属Al线结构的椭圆Bragg衍射光栅的衍射效率相对要小,如图9,分析原因在于金属介质会吸收入射光波的部分能量以及少部分能量衍射到其他级次上造成光栅衍射效率的减小.此外,金属Al线衍射光栅衍射波长的通道均匀性较空气介质衍射光栅的衍射效果要差;相同入射波长下,空气介质型椭圆Bragg衍射光栅的衍射谱线更加细锐,重叠区域较小,串扰小.说明相比于传统蚀刻衍射光栅通过镀金属膜增加衍射效率的方式,使用金属线光栅代替Bragg介质光栅反而会造成衍射效率的下降,存在一定的不足.

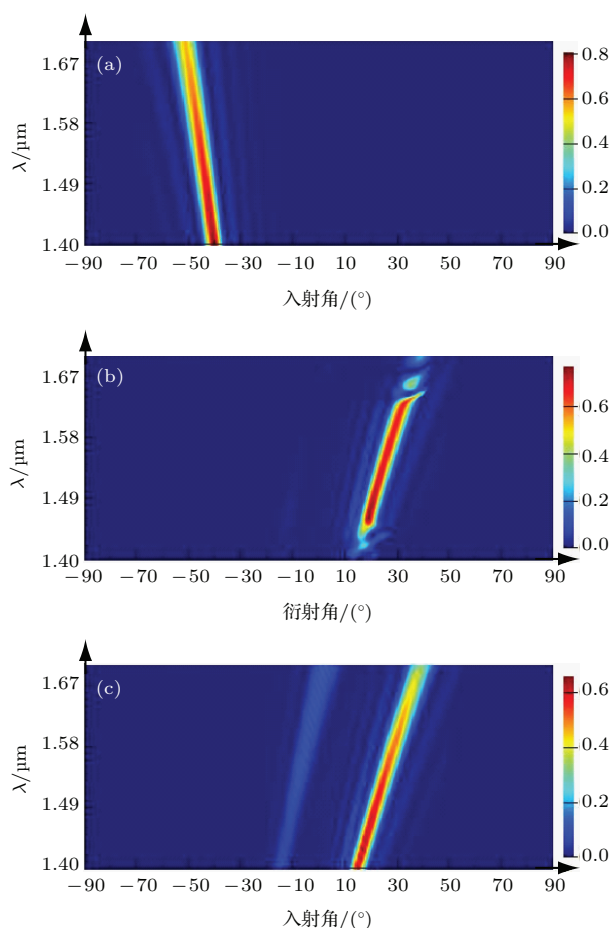


图8 (a) 入射光场分布; (b) 空气介质型椭圆 Bragg 光栅衍射场分布; (c) 金属 Al 线型椭圆 Bragg 光栅衍射场分布
Fig. 8. (a) Incident light field distribution; (b) spatial distribution of light of the air dielectric type elliptical Bragg grating; (c) spatial distribution of light of the Al metallic line type elliptical Bragg grating.

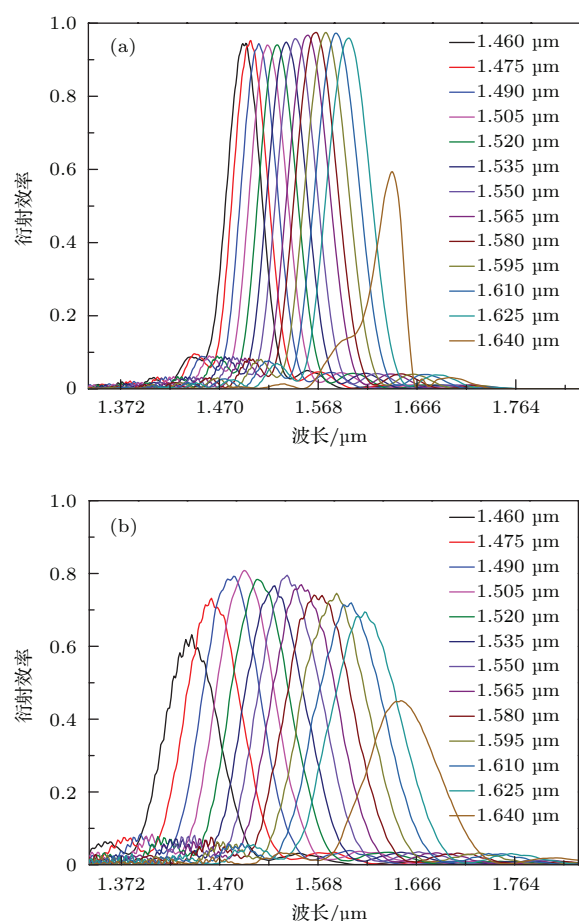


图9 (a) TE 偏振模式空气介质光栅输出谱线; (b) TE 偏振模式 Al 介质光栅输出谱线
Fig. 9. (a) Output through different channels of the air dielectric type grating for TE polarization; (b) output through different channels of the Al metallic line type grating for TE polarization.

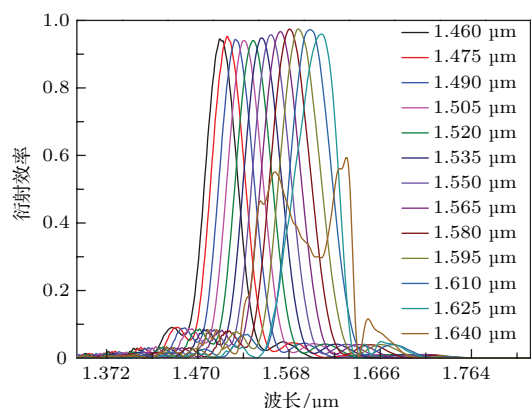


图10 TM 偏振模式空气介质光栅输出谱线
Fig. 10. Output through different channels of the air dielectric grating for TM polarization.

图10是空气型介质光栅在TM偏振模式入射光条件下的输出谱线,从图9(a)和图10可以看出TM/TE模式下,靠近中心波长1550 nm的带宽范围内,椭圆Bragg衍射光栅均具有较好的通道均匀

性;但在远离中心波长的位置处,尤其是波长禁带边缘,衍射效率出现明显降低。

3.2 色散

对于WDM系统,色散^[14]是导致信号形变、展宽,以至最终产生误码的关键因素之一。通常所说的色散影响,主要来自光纤本身,但随着单通道调制速率的不断提高,不光光纤的色散,就连器件本身的色散也会对信号质量产生严重影响。因此对刻蚀光栅器件的色散进行计算,也是在器件设计过程里必须考虑的环节之一。

通常定义两个相邻波长的衍射波阵面之间的角度分离为角色散,通过对光栅方程进行微分处理得到角色散公式为

$$\frac{d\theta_k}{d\lambda} = \frac{\sin\theta_i + \sin\theta_k}{\lambda \cdot \cos\theta_k} = \frac{m}{d \cdot \cos\theta_k}. \quad (4)$$

角色散是相应于波长有一微小变化时对衍射角的变化, 与光栅周期 d 和 $\cos \theta_k$ 成反比, 与衍射级次 m 成正比. 计算多个输出波长衍射波阵面之间角度分离的平均值为 $\Delta \theta_k$, 波长间隔 $\Delta \lambda$, 则角色散为 $\Delta \theta_k / \Delta \lambda$.

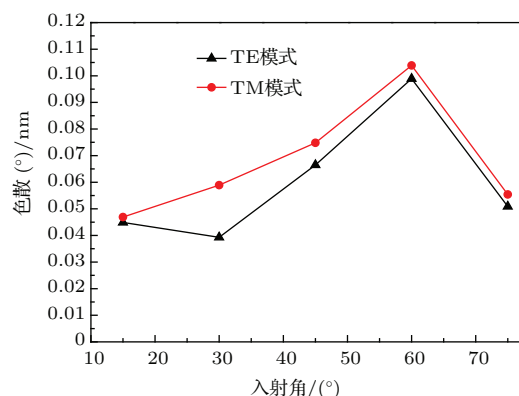


图 11 器件角色散随入射角度的变化

Fig. 11. Angle dispersion varies with the change of incident angle.

图 11 表明相同入射角度下, TM 偏振比 TE 偏振入射具有更大的角色散. 这主要是由于对两种偏振其相位变化分别产生于磁场密度分度和电流密度分布, 其产生的物理本质有明显区别, 自然对两个偏振像场分布的相位变化也有区别. 色散反映了器件的相位特性, 频谱的变化在一定程度上会影响色散的大小.

4 结 论

本文根据 1-D 光子晶体能带理论设计了罗兰圆结构的椭圆型 Bragg 蚀刻衍射光栅, 并研究了 TE/TM 模式下该结构模型的衍射特性以及入射角度对器件色散的影响. 研究表明, 选择合适的器件参数, 可以实现 TE/TM 模式下 1.465—1.615 μm 范围内波长衍射效率 95% 以上, 且空气型结构光栅的通道均匀性要优于金属线型结构光栅; 在

30°—60° 的入射角度范围, 相同入射角度下 TM 入射光模式器件角色散大于 TE 模式. 该结构设计可应用于光通信波分复用器、光开关等, 对于减小器件尺寸, 增加器件集成度具有重要的研究意义.

参考文献

- [1] Wang W M, Liu W, Ma W D 2011 *Acta Photonic. Sin.* **40** 1137
- [2] Shi Z M, He J J, He S L 2004 *J. Opt. Soc. Am. A* **21** 1198
- [3] Erickson L, Lamontagne B, He J J, Delage A, Davies M, Koteles E 1997 *IEEE/LEOS Summer Topical Meetings on WDM Components Technology* Montreal, Canada, August 11–13, 1997 82
- [4] Sadov S Y, McGreer K A 2002 *OPL Soc. Am. A* **17** 1590
- [5] Brouckaert J, Bogaerts W, Selvaraja S, Dumon P, Baets R, Van T D 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 309
- [6] Pottier P, Packirisamy M 2012 *J. Lightw. Technol.* **30** 2922
- [7] Wu D S, Liu X, Li H F 2002 *Acta Photonica Sin.* **31** 360 (in Chinese) [武东升, 刘旭, 李海峰 2002 光子学报 **31** 360]
- [8] Winn J N, Fink Y, Fan S H, Chen C P, Joannopoulos J D, Michel J, Thomas E L 1998 *Opt. Lett.* **23** 1573
- [9] Fink Y, Joshua N, Winn, Fan S H, Chen C P, Jurgen Michel, John D, Joannopoulos J D, Thomas E L 1998 *Science* **282** 1679
- [10] Bidnyk S, Balakrishnan A, Delage A, Gao M, Krug P A, Muthukumaran P, Pearson M 2005 *J. Lightw. Technol.* **23** 1435
- [11] Song J 2007 *Ph. D. Dissertation* (Zhejiang: Zhejiang University) (in Chinese) [宋军 2007 博士学位论文 (浙江: 浙江大学)]
- [12] Lu S Z, You K M, Chen L Z, Wang Y W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 034202
- [13] Shang W L, Yang J M, Zhao Y, Zhu T, Xiong G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094212 (in Chinese) [尚万里, 杨家敏, 赵阳, 朱托, 熊刚 2011 物理学报 **60** 094212]
- [14] Su J, Feng G Y, Zou Q H, Liu Z H, Qiu Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 014201 (in Chinese) [苏娟, 冯国英, 邹其徽, 刘忠华, 邱毅 2013 物理学报 **62** 014201]

Study on planar concave diffraction grating with Bragg reflector facets^{*}

Li Bao Du Bing-Zheng Zhu Jing-Ping[†]

(Shaanxi Key Laboratory of Information Photonic Technique Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 29 November 2014; revised manuscript received 29 January 2015)

Abstract

Based on the fact that Bragg reflection grating(BRG) is a special one-dimensional photonic crystal, we propose to apply the one-dimensional photonic crystal band gap theory to the design of Bragg reflection grating and then to make an analysis of its optical performance. According to the above band gap theory, FDTD solution is used to build the elliptical Bragg etched diffraction grating (EDG) based on the Rowland circle. We have studied the spectral characteristics for both TE and TM modes and the angle dispersion due to the variation of the incident angle, at the same time, the optical performances in the air dielectric type Bragg grating and the Al metallic line type Bragg grating are also made to compare with each other. It turns out that by choosing appropriate parameters the diffraction efficiency can be got more than 95% within the scope of 1.465–1.615 μm in both TE and TM modes, and the air dielectric type Bragg grating structure behaves better in the uniformity throughout the whole channel than in the Al metallic line type Bragg grating structure. When the incident angle varies from 30° to 60° , the angle dispersion in TM mode is larger than that in TE mode. This is the foundation of a new type of EDG wavelength division multiplexer with advantages of small size and high diffraction efficiency. It may have the potential to promote the development of high diffraction efficiency dense wavelength division multiplexer in the future.

Keywords: 1-D photonic crystal, Bragg etched diffraction grating, diffraction efficiency, wavelength division multiplexing

PACS: 42.79.Dj, 42.40.Lx

DOI: 10.7498/aps.64.154211

[†] Corresponding author. E-mail: jpzhu@mail.xjtu.edu.cn