

文章编号: 0253-2239(2003)11-1306-5

平场输入/输出蚀刻衍射光栅的设计*

盛钟延 娄丽芳 何赛灵

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

摘要: 光通信中波分复用技术是解决通信网络瓶颈的有效手段,近年来得到很大发展。以平面波导波分复用器件为核心的密集波分复用技术已经得到成功商用。蚀刻衍射光栅是平面波导密集波分复用器件中很有发展潜力的一种。原有蚀刻衍射光栅采用罗兰圆设计,输入输出在圆弧曲线上由条形波导引出;而平场输入/输出的蚀刻衍射光栅在很多应用中可以省去制作输入输出波导,大大简化制作工艺,同时能够保持良好的线性色散和聚集效果。给出了平场输入和输出蚀刻衍射光栅的设计方法,并利用标量衍射理论对设计的结果进行模拟,验证了平场输出蚀刻衍射光栅具有很好的分波效果。

关键词: 导波和光纤光学; 蚀刻衍射光栅; 平场输出; 平面波导; 罗兰圆; 解复用器
中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

传统的光纤通信传输技术使用单一波长,仅仅利用了光纤低损耗区近 30 THz 带宽的很小一部分,还有很大的潜力。波分复用技术(WDM)使单根光纤传输多个波长,是提高光通信容量的一种有效途径。可同时传输数目较多的波长的密集波分复用(DWDM)目前已经全面应用于主干网络中,同时城域密集波分复用也在飞速发展。随着关键技术的实现和成本的降低,将极大地改善通信现状。实现波分复用的核心器件是波分复用器和解复用器,用于耦合和分离不同光波长(即信道)。多层介质膜滤波器、光纤布拉格光栅、自由空间衍射光栅及集成光

波导光栅^[1,2]等不同的技术已用于实现这类器件,其中集成光波导器件是最有前景的一类。蚀刻衍射光栅是采用单片平面波导技术制成的集成密集波分复用器件,它具有信道损耗低、串扰小、器件尺寸小、容易扩展信道、制作和封装工艺相对简单等优点。

图 1 是蚀刻衍射光栅集成平面波导波分复用器件的原理图^[3,4]。入射光由光纤导入输入波导,再由蚀刻光栅把不同波长的光聚焦在不同的位置,由输出波导导出,实现波分复用。器件集成在单片半导体基底上,其设计的核心是蚀刻光栅。设计好的光栅图形做成掩模,用干法腐蚀工艺在平面波导上蚀刻成衍射光栅。

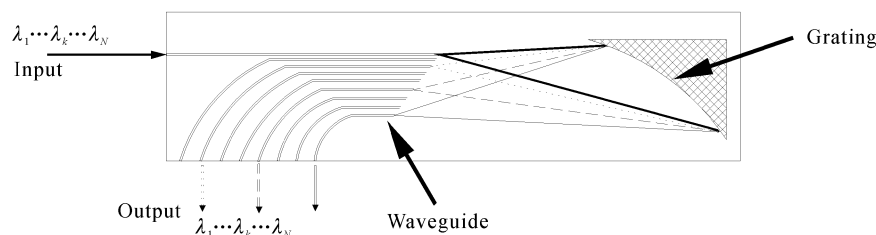


Fig. 1 Schematic diagram for a DWDM device based on an etched diffraction grating

要使输出波导处同时得到不同波长的光信号,须使输入光反射后既能够把光能量会聚到一点,又能够产生色散,使不同波长的光会聚到不同的输出

位置。目前蚀刻衍射光栅型波分复用器件采用罗兰圆^[5]来设计反射光栅、输入波导及输出波导(图 2)。采用罗兰圆结构做成的二维凹面光栅,能够在平面波导上很好地实现密集波分复用。

输入输出在同一平面上会带来很多优势。由于输入输出波导在波导芯层,光栅反射面需要刻蚀多层,通常蚀刻衍射光栅的制作需要两次掩模和对准

* 浙江省科技计划重大项目(001101027)、高等学校重点实验室访问学者基金资助课题。

E-mail: zysheng@coer.zju.edu.cn

收稿日期:2002-08-12; 收到修改稿日期:2002-10-22

光刻及刻蚀。如果设计平场输入/输出的光栅(参见图 3),即各输入/输出通道的端面在同一个平面上,可以将输入面或输出面移到芯片的切割面上,这样输入输出波导就可以省略,大大减少了工艺过程,也可以提高成品率。另外平场输入输出的蚀刻衍射光

栅使输入波导或输出波导可以在输入面或输出面直线移动,器件具有了可调的潜力,在可重构光网络中可以发挥更大的作用。原有的设计不能实现平场输入或输出,本文给出了一种有效的平场输入/输出光栅的设计方法。

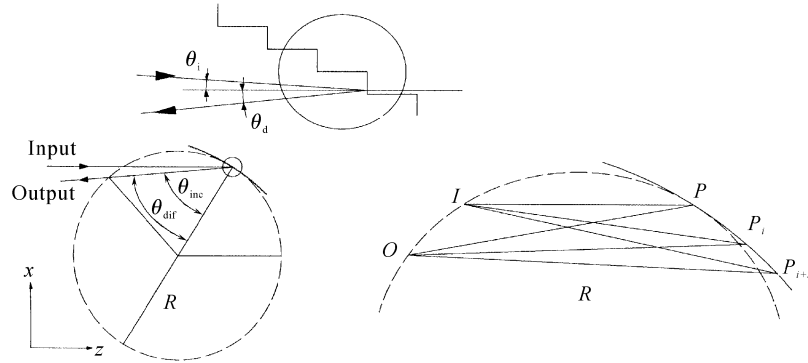


Fig. 2 Geometry of EDG based on the Rowland circle

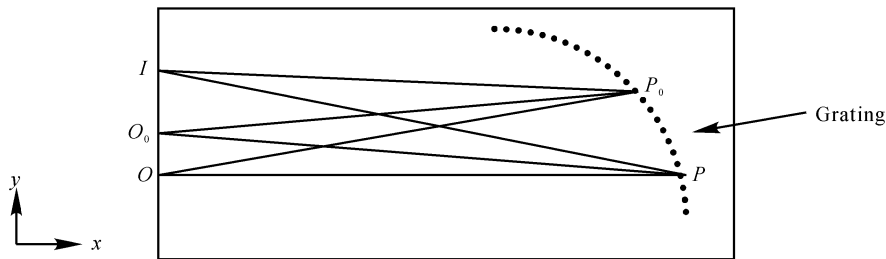


Fig. 3 Schematic diagram of a flat-field-output EDG

2 平场输入/输出光栅的设计

凹面光栅的光栅方程为

$$n_{\text{eff}}d(\sin \theta_{\text{inc}} + \sin \theta_{\text{dif}}) = m\lambda, \quad (1)$$

其中 n_{eff} 是有效折射率, d 是光栅周期, θ_{inc} 是入射角, θ_{dif} 是衍射角, m 是衍射级次, λ 是给定的波长。

在罗兰圆上取一点 P , 在 P 点凹面光栅与罗兰圆相切。衍射级次确定后, 由光栅方程确定衍射角 θ_{dif} , 对应的罗兰圆上的点取为输入位置。传统蚀刻衍射光栅设计是在罗兰圆上光输入位置 (I) 附近取一点 (O) 作为给定波长的输出无像差点, 由各槽面中心位置确定的光程差为波长的整数倍, 从而决定槽面中心的位置。如图 2 所示, 有

$$n_{\text{eff}} = [IP_{i+k} + P_{i+k}O - (IP_i + P_iO)] = km\lambda, \quad (2)$$

这里 i, k 是整数, P_i 和 P_{i+k} 表示第 i 个和第 $i+k$ 个光栅齿面的中点。在传统的设计中, P_i 在以罗兰圆直径为半径的圆上, 这个圆与罗兰圆在 P 点相切。

这样就保证了在小范围内, 光在罗兰圆上入射, 其出射也在罗兰圆上^[5]。文献[6]中证明了近轴情况像差保证了一阶和二阶导数为 0。

很明显, 输出面在罗兰圆的弧线上而不在直线上。特别的, 我们希望输入输出面在垂直于光传播方向的直线上, 即平行于 y 轴, 这样可以省去入射和出射波导。

引入光栅的光程决定的像差函数:

$$F(x, \lambda) = n_{\text{eff}}[IP + PO - (IP_0 + P_0O)] - G(x)m\lambda, \quad (3)$$

这里 I 是入射点, P_0 是光栅参考点, P 是光栅上的点, O 是在垂直边缘直线上的输出位置, $G(x)$ 是光栅周期函数。通常只需要确定光栅反射面中心点的位置, 即 $G(x)$ 取整数 k , 像差函数变成

$$F(k, \lambda) = n_{\text{eff}}[IP_k + P_kO - (IP_0 + P_0O)] - km\lambda, \quad (4)$$

将各点坐标 $I(x_I, y_I), O(x_O, y_O), P_k(x_{P_k}, y_{P_k}), P_0(x_{P_0}, y_{P_0})$ 代入(4)式有

$$F(k, \lambda, y_0) = n_{\text{eff}} \left\{ \sqrt{(x_I - x_{P_k})^2 + (y_I - y_{P_k})^2} + \sqrt{(x_O - x_{P_k})^2 + (y_O - y_{P_k})^2} - \left[\sqrt{(x_I - x_{P_0})^2 + (y_I - y_{P_0})^2} + \sqrt{(x_O - x_{P_0})^2 + (y_O - y_{P_0})^2} \right] \right\} - km\lambda. \quad (5)$$

要使设定点 $O_0(x_{O_0}, y_{O_0})$ 附近位置像差很小, 光栅上的点 $P_k(x_{P_k}, y_{P_k})$ 需要满足

$$F(k, \lambda_0, y_{O_0}) = 0, \quad (6)$$

以及光程差函数对输出点 y 坐标在 O_0 处的导数

$$F'(k, \lambda_0, y_{O_0}) = 0. \quad (7)$$

符合(6)式的光栅点 $P_k(x_{P_k}, y_{P_k})$ 在一个椭圆上[特别情况下如果 $O_0(x_{O_0}, y_{O_0})$ 与入射点 I 重合, 则在一个圆上]。

取 $x = 0$ 为输出曲线, (7) 式可写为

$$F'(k, \lambda_0, y_{O_0}) = n_{\text{eff}} \left[\frac{y_{O_0} - y_{P_k}}{\sqrt{(x_{O_0} - x_{P_0})^2 + (y_{O_0} - y_{P_k})^2}} - \frac{y_{O_0} - y_{P_k}}{\sqrt{(x_{O_0} - x_{P_k})^2 + (y_{O_0} - y_{P_0})^2}} \right] - kmD, \quad (8)$$

这里 $D = \left. \frac{d\lambda}{dy_0} \right|_{y_0=y_{O_0}}$, 是光栅的线色散率。

在需要多个输入波导的情况下, 同样可以用这样的方法设计平场输入蚀刻衍射光栅。要使设定点 $I_0(x_{I_0}, y_{I_0})$ 附近位置像差很小, 由(9)式和(10)式决定各个光栅齿面的位置:

$$F(k, \lambda_0, y_{I_0}) = 0, \quad (9)$$

$$F'(k, \lambda_0, y_{I_0}) = 0. \quad (10)$$

3 模拟计算与结果分析

这里使用比较精确的标量衍射理论对设计进行模拟, 具体推导见文献[7]。

光栅上的场分布可以用下式表示:

$$E_{\text{grating}}(x', z') = \frac{1}{2} \left(\frac{n}{\lambda} \right)^{1/2} \int_{\text{taper}} \frac{E_{\text{in}}(x, z)}{\sqrt{|\mathbf{r}_g - \mathbf{r}_t|}} (\cos \theta_i + \cos \theta_d) \exp(-ik|\mathbf{r}_g - \mathbf{r}_t|) ds, \quad (11)$$

这里 xz 是蚀刻衍射光栅所在平面, 对应于图 2、图 3 中的 yx 平面。 E_{in} 是输入场分布, 通常近似为高斯分布。 $|\mathbf{r}_g - \mathbf{r}_t|$ 是入射面到光栅齿面的距离, n 和 λ 是有效折射率和中心波长, θ_i 和 θ_d 是对应的光栅齿面的入射角和衍射角。同样可以得到输出位置 (x'', z'') 处的场分布:

$$E_{\text{out}}(x'', z'') = \frac{1}{2} \left(\frac{n}{\lambda} \right)^{1/2} \int_{\text{grating}} R \frac{E_{\text{grating}}(x', z')}{\sqrt{|\mathbf{r}_o - \mathbf{r}_g|}} (\cos \theta'_i + \cos \theta'_d) \exp(-ik|\mathbf{r}_o - \mathbf{r}_g|) ds. \quad (12)$$

假设输出波导垂直于 x 轴, 其本征模场可以表示为 $E_{\text{eigen}}(x)$, 在输出波导端面的光栅反射场分布可以表示为 $E_{\text{out}}(x)$ 。耦合进入输出波导的光可以用两者的叠加积分来计算:

$$I = \left| \int_{\text{output}} E_{\text{out}}(x) E_{\text{eigen}}^*(x) dx \right|^2. \quad (13)$$

由于蚀刻衍射光栅是一个线性色散的器件, 不同波长入射其输出场分布形状相同, 只是位置线性变化, 这样其频谱响应如下:

$$I(\lambda) = \left| \int_{\text{output}} E_{\text{out}}[x - k(\lambda - \lambda_0)] E_{\text{eigen}}^*(x) dx \right|^2, \quad (14)$$

这里 λ_0 是指定的中心波长, k 是蚀刻衍射光栅色散率。考虑偏振效应可参考文献[8]。

作为例子, 这里选用一个平场输出设计和一个传统罗兰圆设计作为比较。为了便于比较, 光栅的入射点和出射点重合, 两种设计方法的色散也一致, 采

用的设计参量如表 1 所示。

对两个光栅的模拟都采用高斯近似的入射光, 束腰半径为 $5 \mu\text{m}$; 同时输出光纤的本征模场与入射模场一致(并已经归一化)。输出面都设在 $x=0$ 的直线上。

Table 1 Parameters for 2 designs of the gratings

Input point $I / \mu\text{m}$	(0, 0)
Grating reference point $P_0 / \mu\text{m}$	(15000, 0)
Output aberration-free point $O / \mu\text{m}$	(0, 0)
Central wavelength λ / nm	1550
Effective refractive index	1.476
Grating linear dispersion $/ (\mu\text{m}/\text{nm})$	19.3548
Grating diffraction order m	20

这里有 21 个不同波长(从 1540 nm 到 1560 nm, 间隔 1 nm)的光入射到设计的光栅, 用(11)式、(12)式和(14)式计算。图 4 是平场输出设计的光栅在不同波长入射时的出射场, 图 5 是以这

些波长为中心波长的各输出通道的频谱。可以看出,平场输出在给定的范围里输出场与输入场吻合得很好,相应的频谱也很均匀,保持了线性色散,而且各通道的通带宽度也很均匀。同时理论损耗也接近 0。

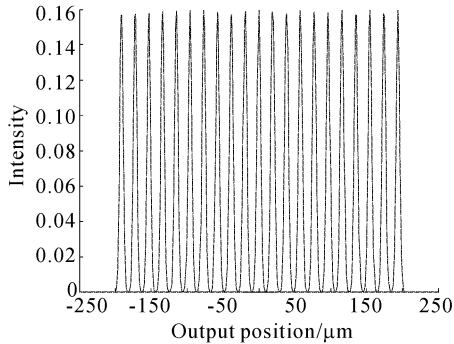


Fig. 4 Output fields for different incident wavelengths for a flat-field-output EDG

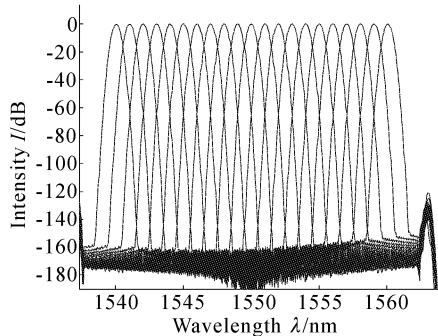


Fig. 5 The spectral response for the flat-field-output EDG

图 6 是按传统罗兰圆设计光栅的各个波长入射得到的出射场,图 7 是相应的频谱。传统设计的光栅由于原本输出面在一段圆弧上,而这里强制使输出面为平面,因此聚集效果不理想。可以看出,在接近中心处,即在设计波长附近,光场分布和频谱响应才比较接近。而离开设计点的稍远位置,模场逐渐

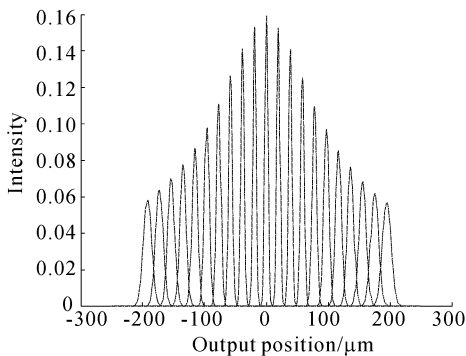


Fig. 6 Output fields for different incident wavelengths for a Rowland-type EDG

展宽,聚集性能劣化。相应的频谱展宽,损耗逐渐变大,器件性能受到很大影响。

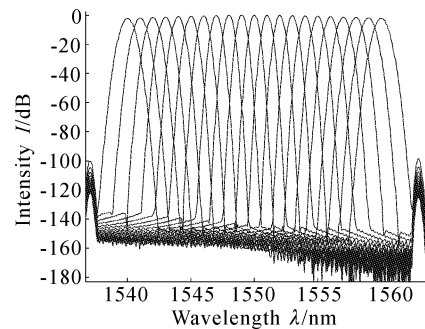


Fig. 7 The spectral response for the Rowland-type EDG

实际工作中,平场光栅设计也只是在一定的输出范围内得到较好的效果,而超过了一定范围,聚集效果将变差,色散曲线也会弯曲而不是准确的线性。这是因为光栅像差的高阶导数不能够减小到 0,随着输出远离设计点,像差也将逐渐增大。但从图 4 的结果可以看出,这个范围还是很大的,足以满足实际应用的需要。

总结 平场光栅在很多场合具有优势,直接使用原有的罗兰圆设计是不适合的,正如图 6、图 7 的计算结果所示,边缘通道的频谱响应迅速恶化。本文提出了设计平场光栅的方法,可以实现平场输出,即各输出通道的端面在同一个平面上。用相同的原理,对公式稍作改动,也可以实现平场输入。本文用比较精确的标量衍射理论方法模拟新设计的光栅,得到非常均匀的多波长入射的场分布和多通道频谱响应,而且没有引入额外的损耗,达到了预期的效果。

参 考 文 献

- 1 Cremer C, Emeis N, Schier M *et al.*. Grating spectrograph integrated with photodiode array in InGaAsP/InGaAs/InP. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(1):108~110
- 2 Smit M K. Phasar-based WDM-devices: Principles, design and applications. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 1996, **2**(2):236~250
- 3 He J J, Kotels E S, Lamontagne B *et al.*. Integrated polarisation compensator for WDM waveguide demultiplexers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(2):224~226
- 4 Gini E, Hunziker W, Melchior H. Polarization independent InP WDM multiplexer/demultiplexer module. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(4):625~630
- 5 Hutley M C. *Diffraction Gratings*. New York: Academic, 1982. 215~232
- 6 Wang Daoyi, Jin Guofan, Yan Yingbai *et al.*. Aberration

- theory of arrayed waveguide grating. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(2):279~284
- 7 Sheng Zhongyan, He Saiming, He Jianjun. Simulation of etched diffraction grating using scalar diffraction theory. *Opto-Electronic Engineering* (光电工程), 2001, **28**(6): 29~32 (in Chinese)
- 8 Ou Haiyan, Lei Hongbing, Yang Qinqing *et al.*. Theoretical analysis on polarization characteristics of silicon-based silica optical waveguide devices. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(1):122~124 (in Chinese)

Design of an Etched Diffraction Grating with Flat-Field Input/Output

Sheng Zhongyan Lou Lifang He Sailing

(State Key Lab of Modern Optical Instrument, Center for Optical and Electromagnetic Research,
Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 12 August 2002; revised 22 October 2002)

Abstract: Wavelength division multiplexing (WDM) is in a great development recent years to meet the fast-grown demand for the communication capacity, and dense wavelength division multiplexing (DWDM) has been put into a successful commercial use. As a key device in a DWDM system, etching diffraction grating (EDG) is a planar waveguide DWDM device with a great potential. Although an EDG is harder to fabricate than an AWG (arrayed waveguide grating), it has a better spectral fineness and can easily implement more output channels. A design method for an EDG of flat input/output is presented. The scalar diffraction theory is used to verify the design, the numerical results show that the designed EDG has a good performance. A conventional EDG design is based on the Rowland circle on which the end points of the input and output waveguides are located. This configuration has a good focal property but needs the fabricating of the output channels to couple the light with output fibers. An EDG of flat-field input/outputs can also maintain a good linear dispersion and a perfect focused field as a conventional EDG.

Key words: guided wave and fiber optics; etched diffraction grating (EDG); flat-field output; planar waveguide; Rowland circle; demultiplexer