

刻蚀衍射光栅解复用器的偏振色散分析*

庞冬青 宋 军 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, 光通信联合实验室, 杭州 310027)

摘要: 介绍了一种将矩量法应用于刻蚀衍射光栅解复用器设计分析的偏振敏感型方法. 通过数值分析, 证明提供的方法在分析器件色散响应方面比传统的标量方法更加接近实测结果. 分析了器件的偏振独立损耗和偏振色散差随入射角和衍射级的变化关系, 指出器件结构参数的确定应以满足偏振色散差的实际需要为主, 而在考查通道均匀性方面则应该着重考虑结构参数对偏振独立损耗特性的影响.

关键词: 波分复用; 解复用器; 刻蚀衍射光栅; 矩量法; 色散; 偏振

EEACC: 4130; 4140

中图分类号: TN814.6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)01-0133-05

1 引言

近年来光通信飞速发展, 波分复用技术(WDM)是解决信息容量需求的有效手段. 作为波分复用技术中最关键的器件, 平面波导密集波分复用器件是很有发展潜力的. 其中最重要的有阵列波导光栅(AWG)^[1]和刻蚀衍射光栅(EDG)^[2]两种. 随着深刻蚀技术的日益成熟, EDG 器件以其结构紧凑和比 AWG 器件更优越的频谱性能日益得到广泛的应用.

在通常的 EDG 器件的设计过程中, 标量衍射因为简单快速而成为非常流行的设计方法^[3~6]. 但是该方法不能准确地反应具体光栅面形的衍射效率差别, 更不能对偏振特性进行研究. 而且对于那些光栅周期接近几个波长的光栅, 标量衍射方法近似条件已经失效(标量衍射要求光栅周期远大于波长). 因此, 以标量衍射方法设计的器件虽然可以获得比较好的频谱响应, 但是其综合性能却比理论设计差很多. 为了使理论设计更加完善, 综合考虑到器件的各种性能, 必须考虑偏振敏感型的设计方法.

然而通常的偏振敏感型光栅的设计方法都难以直接应用于 EDG 的设计. 比如在光栅严格设计中最通用的方法——严格耦合波理论(RCWA)主要适用

于无限周期性光栅, 而无法分析具有变周期凹面结构的 EDG 器件. 另外, 由于器件具有大的自由扩散区(FPR), 也无法用计算时间强烈受限于计算区域的时域有限差分方法(FDTD)进行分析.

为了提高 EDG 光栅的衍射效率, 通常在光栅的背面镀一层金属(如银等), 因此 EDG 的光栅可以近似于一个理想的金属光栅. 对于此类光栅, 矩量法(MoM)是一种非常简单而又有效的偏振敏感型分析方法. 本文将矩量法引入 EDG 器件的设计分析, 能够在较短时间内对两种偏振的性能做出准确分析. 特别针对传统标量衍射方法在分析器件相位响应方面存在的不足, 以 MoM 方法分析了器件的色散响应. 结果证明现在的方法能够更加准确地分析器件的色散特性. 同时, 通过数值模拟证明器件结构参数的确定应以满足偏振色散差的实际需要为主, 而在考查通道均匀性方面则应该着重考虑结构参数对偏振独立损耗特性的影响.

2 理论分析

如图 1 所示, EDG 器件基于罗兰圆结构设计, 包括输入波导阵列、输出波导阵列、自由扩散区(FPR)和刻蚀凹面光栅四部分. 全部模拟过程可以分为如

*国家自然科学基金资助项目(批准号: 90101024, 60277018)

庞冬青 女, 1972 年出生, 博士后, 从事激光和光通信元件及工艺研究.

2003-12-21 收到, 2004-02-24 定稿

下步骤:

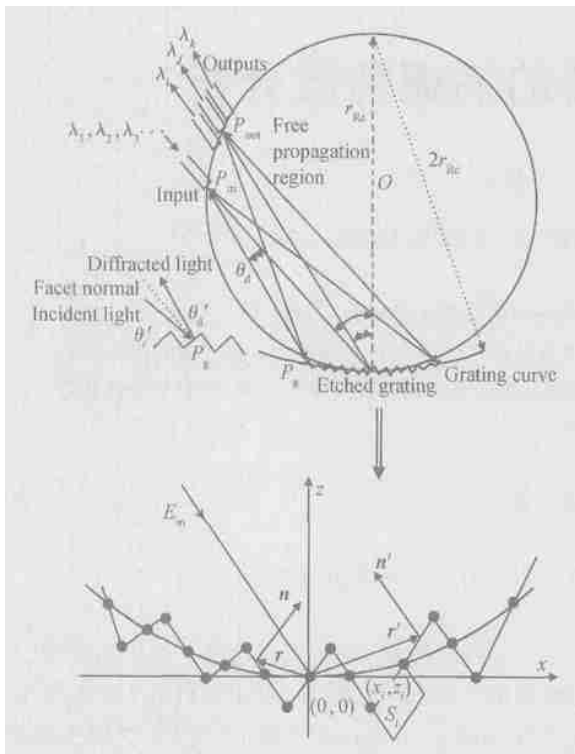


图 1 基于罗兰圆结构的 EDG 解复用器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an EDG demultiplexer based on a Rowland circle mounting

(1) 计算光栅表面入射场. 由于 FPR 是各向同性的, 因此仍可使用 Kirchhoff-Huygens 原理计算光栅上任意一点 $P_g(x, z)$ 上的入射场, 计算使用沿输入波导末端端面的积分^[6],

$$E_g(x, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{n_{\text{eff}}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \int_{\text{input}} \frac{E_{\text{in}}(x, z)}{\sqrt{|P_{\text{in}} P_g|}} (1 + \cos \theta) e^{-jk|P_{\text{in}} P_g|} dl \quad (1)$$

其中 n_{eff} 和 k 分别是 FPR 内的有效折射率和波矢; λ 是真空波长; E_{in} 代表输入波导内不同偏振的基模电场分布; j 是虚数单位. 其他几何参数如图 1 所示. 在以下的分析中均把 TE 和 TM 波分别进行处理.

(2) 计算入射场在光栅表面引起的电流密度分布. $J_e = n \times H = J_e z$ (或 $J_m = n \times E = J_e z$), 其中 e_z 代表沿着 z 向的单位矢量, n 代表光栅表面法向量. 对理想金属光栅 (在数值分析中均假设 EDG 光栅为理想光栅, 即介电常数的虚部远远大于实部), 边界条件要求表面全部切向电场为 0. 因此对于 TE 偏

振, 可以获得磁场积分方程 (MFIE)^[7],

$$J(r)/2 + (jk/4) \int_{\text{Gratings}} \cos \theta \times H_1^{(2)}(k|r-r'|) \times J(r') ds = H_g(r) \quad (2)$$

其中 r 和 r' 为光栅表面任意两点的矢径, 分别为光栅表面任意两点; $H_g(r)$ 是 r 对应点处的入射磁场; $\cos \theta = (r - r') \cdot n / |r - r'|$; $H_1^{(2)}$ 是第二类一级 Hankel 函数.

利用 MoM, 可以将光栅表面划分成 N 个小的直线部分, 其中第 i 部分的长度是 S_i . 而电流密度 J 可以用一系列脉冲函数表示, 这样利用点匹配方法^[8], 方程 (2) 可以化为矩阵方程的形式,

$$WJ = H \quad (3)$$

其中^[7]

$$W_{mn} = \begin{cases} \frac{jk}{4} \int_{S_m} \cos \theta_{mn} \times H_1^{(2)}(k|r_m - r_n|) S_n, & m \neq n \\ 1/2, & m = n \end{cases}$$

$$J_n = J(r_n), \quad H_n = H_g(r_n)$$

其中 m, n 均为从 $1 \dots N$ 的任意自然数.

对于 TM 偏振由电场积分方程 (EFIE), 同样可以获得 (3) 式的矩阵方程, 相应的矩阵元 W 为^[7],

$$W_{mn} = \begin{cases} (k/4) \int_{S_m} S_i H_0^{(2)}(k|r_m - r_n|), & m \neq n \\ (S_n k / 4) \left[1 - j \frac{2}{3} \ln \left(\frac{0.4 S_n}{4e} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{k S_n}{4} \right)^2 \right] \times \\ \left[\left(1 + j \frac{2}{3} \right) + j \frac{2}{3} \left(\frac{k S_n}{4} \right)^2 \ln \left(\frac{0.4 S_n}{4e^{1/3}} \right) \right], & m = n \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\gamma_0 = 1.781$, 真空波阻抗 $Z_0 = 376.73031 \Omega$, $H_0^{(2)}$ 是第二类零级 Hankel 函数.

(3) 计算从光栅表面到输出波导端面的衍射成像. 一旦方程 (3) 中的电流密度 J 被求解, 任意一点的远场散射可以容易获得. 对于 TE 偏振可以使用方程^[9],

$$H^d(r_d) = \left\{ \frac{k \exp[-j(kr_d + 3/4)]}{\sqrt{8kr_d}} \right\}_{n=1}^N S_n J(r_n) \times \cos \theta_n \exp[jk(x_n \sin \theta_{\text{diff},0} + z_n \cos \theta_{\text{diff},0})] \quad (5)$$

对于 TM 偏振相应使用方程^[9],

$$E^d(r_d) = \left\{ \frac{k_0 \sqrt{\mu} \exp[-j(kr_d + 1/4)]}{\sqrt{8kr_d}} \right\}_{n=1}^N S_n J(r_n) \exp[jk(x_n \sin \theta_{\text{diff},0} + z_n \cos \theta_{\text{diff},0})] \quad (6)$$

其中 r_d 是从坐标原点到输入波导端任意一点的

矢径； $\theta_{diff,0}$ 是衍射角。

对于两种偏振,输出像场 $E_{image}(x, z)$ 可以不断使用 (5), (6) 两式,在输出波导端面进行扫描获得。

(4) 色散的计算. 定义 $D = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial \omega^2} \times \frac{\partial}{\partial \omega}$, 则色散大小可以表示为^[10],

$$D = \frac{d}{d\omega} = -\frac{1}{2} \frac{1}{c} \times \left[2 \frac{\partial}{\partial \omega} + \omega^2 \frac{\partial^2}{\partial \omega^2} \right] \quad (7)$$

其中 c 为真空光速; 相位响应 ϕ 为重叠积分

$E_{image}(x, z) E_{outwg}^*(x, z) dx$ 的相位部分, E_{image} 和 E_{out} 分别代表像场分布和单模输出波导中的基模场分布. 由于计算得到的相位响应 ϕ 是一个离散的数组向量, 因此计算色散 D 较方便的方法就是通过数值差分算法. 可以化简(7)式如下,

$$D_i = \frac{(2\phi_{i+1} + \phi_i)^2 - 2(\phi_{i+1} + \phi_i)\phi_{i-1} + \phi_{i-1}^2}{-2c \left(\frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\omega_{i+1} - \omega_i} \right)^2} \quad (8)$$

3 数值计算

在下面的数值计算中,均选用硅基二氧化硅波导,芯层折射率 $n_r = 1.454$,包层折射率 $n_c = 1.445$,芯层厚度 $6\mu m$,中心波长 $\lambda = 1.55\mu m$,频带间隔 $\Delta f = 100 GHz$,输入输出波导宽度 $6\mu m$.

3.1 标量方法在器件相位分析中的不足

要想得到一个性能优越的器件设计,必须综合考虑器件的强度响应和相位响应,然而通常的标量方法虽然可以准确有效地用于 EDG 器件的带宽设计和成像位置分析,但是不能很好地反应器件的相位响应,因为器件的相位改变主要来自光栅,即不能很好地分析光栅面形对相位的作用. 因此使用标量方法设计得到的器件,在理论上虽然具有良好性能,但实际器件却并不理想。

以一个 17 通道的 EDG 器件为例,选择光栅的两个主要结构参数即入射角(即光栅角)为 40° 和衍射级为 15.

通过标量设计的结果,其在 ITU 窗口 $[-12.5 GHz, 12.5 GHz]$ 内的最大值通常小于 $5 ps/nm$ ^[3~6],而实际器件的色散值均在 $10 ps/nm$ 以上. 而且对两种偏振,他们的色散响应也都存在较大差别,

而使用标量方法无法分析这些特性. 对上面提到的设计参数,图 2 分别给出了标量计算和使用 MoM 计算得到的两种偏振的色散响应. 由于实际器件制作过程必然受到工艺误差的限制,图中给出的 MoM 计算结果虽然不可能完全和实际结果一致,但是他们的变化趋势却非常吻合. 例如在 ITU 窗口 TM 偏振具有比 TE 偏振更大的色散,两种偏振在 ITU 窗口内的峰值色散都出现在中心位置,两种偏振在 ITU 窗口内的平均色散均大于 $10 ps/nm$,这些结论都与实测吻合. 然而标量方法却没有给出,甚至错误给出类似结论. 这一方面说明 MoM 方法比起传统的标量设计方法,在分析器件色散响应方面更加有效,同时也证明了数值分析的正确性。

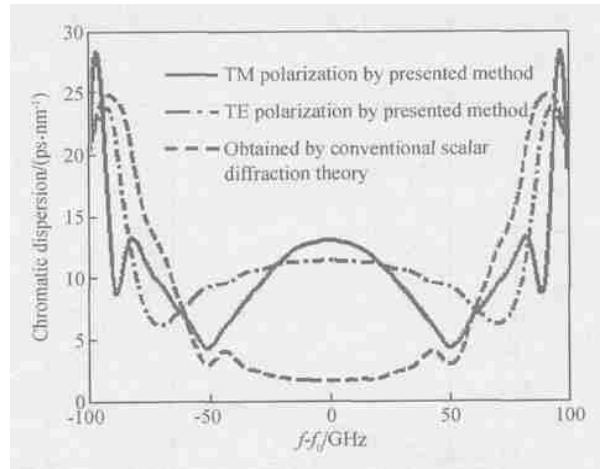


图 2 标量方法和 MoM 计算的色散比较

Fig. 2 Comparison of the chromatic dispersion for the TM and TE polarization with one attained by using a scalar simulation

3.2 EDG 器件的偏振色散特性分析

对于一个集成波导器件,两个偏振态之间存在不同程度的色散,它们的差值可以称为偏振色散差 (PDD),它虽不完全等同于通常所说的偏振模色散 (PMD),但是两者的起因和对波分复用的影响却非常相似. 通常 PDD 同偏振独立损耗 (PDL) 一起,共同对信号的传输造成影响,使信号发生扭曲或变形,严重时甚至引起误码^[11]. 因此,在对器件的色散特性进行分析时,应特别对 PDD 特性和 PDL 特性进行分析。

对一个确定的波长,定义最大偏振色散差 D 为该波长偏振色散差在 ITU 窗口内的最大值. 下面着重分析决定器件几何面形的两个关键参数,即光

栅中心位置入射角 α_{in} (如图 1 所示) 和衍射级 m 对中心波长处的 D 和 PDL 的影响.

图 3 表示对于几个特定衍射级在中心波长处 D 随入射角变化关系曲线, 可以看到在大入射角时, 器件的两个不同偏振的色散响应存在较大差异, 特别是对于稍大的衍射级, 当入射角大于 45° 时, D 超过了 $10\text{ps}/\text{nm}$, 甚至更大, 这使得信号在经过解复用器后严重失真. 为了获得比较好的性能, 器件可以使用的最大入射角和衍射级都受到了限制. 但是, 以往的标量设计, 由于对光栅入射角没有什么强制性限制, 且大的入射角可以使器件结构更加紧凑, 因此在设计时往往选择 45° 以上的入射角, 现在证明这样的参数选择不合理的, 也说明了对于 SiO_2 材料这样的弱限制波导 EDG 器件, 结构不可能做得非常紧凑.

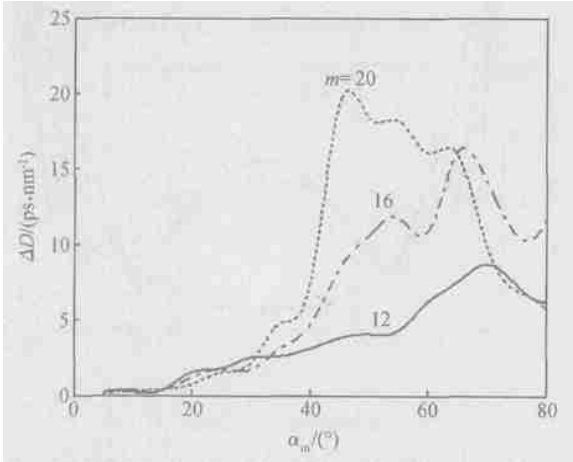


图 3 D 随光栅入射角变化关系曲线

Fig. 3 D of the EDG chip as the grating angle α_{in} increases

对应图 3 的分析方法, 图 4 给出了 PDL 值随入射角变化的关系曲线. 可以看到, 在大的入射角时, PDL 值同样非常大, 但是在中小角度的时候 PDL 比 D 变化平缓得多. 因此, 在确定最大入射角和衍射级的时候, 应该主要以 PDL 特性为准. 例如, 选择入射角为 25° , 衍射级为 12, 可以保证器件具有理想的偏振色散特性.

以上分析都是针对中心波长进行的, 对于一个可以实用的 EDG 器件, 应该在使用各通道内都有较好的性能, 即有较好的通道均匀性. 仍旧使用入射角为 25° , 衍射级为 12 这样的参数, 图 5 给出了 PDL 在 $\pm 20\text{nm}$ (可以容纳 50 个通道) 波长范围内的 PDL 变化, 可以看到此时器件 PDL 响应的通道均匀性比较

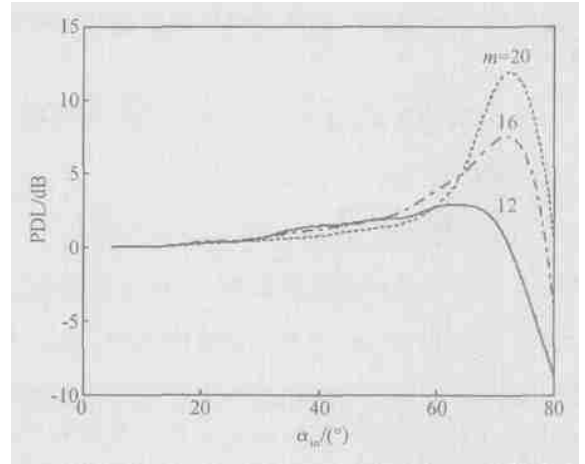


图 4 PDL 随光栅入射角变化关系曲线

Fig. 4 PDL of the EDG chip as the grating angle α_{in} increases

理想. 同时, 也可以看到 PDL 变化并不是中心波长对称的, 峰值出现在长波方向. 而对 D 进行考查发现, 在同样的波长范围内, 几乎是不变的, 说明在考查通道均匀性方面应该主要考虑结构参数对 PDL 特性的影响.

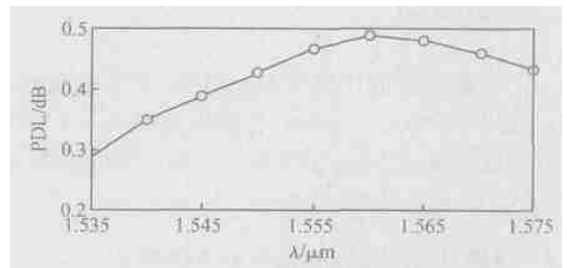


图 5 PDL 随波长变化关系曲线

Fig. 5 PDL of the EDG chip as the wavelength increases

4 结 论

本文针对一种常用的集成波导波分复用器件 EDG, 基于 MoM 分析, 提出了一种新的偏振敏感型设计方法. 对传统标量设计在色散分析方面的不足进行了讨论, 指出现在的方法在色散分析上更加有效. 对于影响集成波导器件信号传输的两个关键性能参数即偏振独立损耗和偏振色散差进行了分析, 指出入射角和衍射级主要应由偏振色散差特性确定, 而通道间的均匀性应主要考查偏振独立损耗特性.

需要特别指出的是, 在本文的数值分析中, 使用 MoM 时, 每个光栅齿被分割成了 15 个格点. 计算一

次频谱响应,在一台 Pentium (2.4GHz) 的个人计算机上,仅花费了大约 1h,这是任何通常的矢量计算方法无法实现的。

参考文献

- [1] Ou Haiyan,Lei Hongbing ,Yang Qinping ,et al. Simple method for design 1×8 arrayed waveguide grating multidemultiplexers. Chinese Journal of Semiconductors ,2000 ,21(8) :798 (in Chinese) [欧海燕,雷红兵,杨沁清,等. 1×8 阵列波导光栅复用/解复用器光栅孔径对器设计的一种简单方法. 半导体学报,2000,21(8) :798]
- [2] Song Jun ,Mei Weiquan ,Wen Hongqiao ,et al. Analysis of the aberration characteristics for an etched diffraction grating. Chinese Journal of Semiconductors ,2003 ,24(10) :1103 (in Chinese) [宋军,梅维泉,文泓桥,等. 刻蚀波导光栅像差特性分析. 半导体学报,2003,24(10) :1103]
- [3] He J J ,Lamontagne B ,Delage A ,et al. Sources of crosstalk in grating based monolithic integrated wavelength demultiplexers. Proceedings of SPIE ,1998 ,3491 :593
- [4] McGreer A C. Diffraction from concave gratings in planar waveguides. IEEE Photonics Tech Lett ,1995 ,7(3) :324
- [5] Song J ,Pang D Q ,He S L. A planar waveguide demultiplexer with a flat passband ,sharp transitions and a low chromatic dispersion. Opt Commun ,2003 ,227 :89
- [6] Song Jun ,Shi Zhimin ,He Sailing. A pre-shaped MMI input structure in an etched diffraction grating for a flat-top spectral response with low crosstalk. Chinese Journal of Semiconductors ,2004 ,25(2) :195 (in Chinese) [宋军,石志敏,何赛灵. 低串扰平顶型刻蚀衍射光栅解复用器的设计. 半导体学报,2004,25(2) :195]
- [7] Chen M F ,Chen D S ,Fung A K. A study of the validity of the integral equation model by moment method simulation cylindrical case. Remote Sensing Environ ,1989 ,29(3) :217
- [8] Harrington R F. Field computation by moment methods. New York : IEEE Press ,1993
- [9] Axline R M ,Fung A K. Numerical computation of scattering from a perfectly conducting slightly rough surface. IEEE Trans Antenn Propagat ,1978 ,26(3) :482
- [10] Kikuchi N. Adaptive chromatic dispersion compensation using higher order polarization mode dispersion. IEEE Photonics Technol Lett ,2001 ,13(10) :1115
- [11] Guo L W ,Zhou Y W ,Fang Z J. Pulse broadening in optical fiber with polarization mode dispersion and polarization dependent loss. Opt Commun ,2003 ,227 :83

Polarization Dispersion Analysis for Etched Diffraction Grating Demultiplexer^{*}

Pang Dongqing , Song Jun , and He Sailing

(State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation , Center for Optical and Electromagnetic Research , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China)

Abstract : A design and simulation method based on the method of moment (MoM) is proposed for an etched diffraction grating (EDG) demultiplexer. The method of moment is used to calculate the surface current ,which produces the diffracted field at the image plane ,for both polarizations. Some misplaying at the aspect of the chromatic dispersion characteristic are analyzed using a conventional scalar design for an EDG demultiplexer. It is shown that the primary structure parameters (i. e. the incident angle and the diffraction order) influence the difference of the chromatic dispersions between both polarizations more than the polarization dependent loss. However ,when a uniformity of the passband is considered ,the structure parameters are obtained mainly based on the characteristic of the polarization dependent loss.

Key words : wavelength division multiplexing ; demultiplexer ; etched diffraction grating ; method of moment ; chromatic dispersion ; polarization

EEACC : 4130 ; 4140

Article ID : 0253-4177(2005)01-0133-05

*Project supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 90101024 ,60277018)

Pang Dongqing female ,was born in 1972 ,postdoctor. Her current research activities are in fabrication of integrated wavelength division multiplexers.

Received 21 December 2003 ,revised manuscript received 24 February 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics