

刻蚀衍射光栅像差特性分析*

宋 军 梅维泉 文泓桥 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: 对作为波分复用关键器件之一的刻蚀衍射光栅(EDG)的像差特性提出了一种简单方便的计算方法, 分析了像差对刻蚀衍射光栅频谱响应的影响. 理论推导了基于基尔霍夫衍射、角谱衍射以及快速傅里叶变换等方法. 最终证明彗差会造成谱形失称, 明显降低耦合效率; 而球差则会明显地增加串扰. 并指出当像差存在时通过输出端加 taper 结构, 并不能显著改善器件的串扰特性.

关键词: 刻蚀衍射光栅(EDG); 波分复用; 波像差; 球差; 彗差; 串扰; 耦合效率

EEACC: 4130; 4140

中图分类号: TN814.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2003)10-1103-06

1 引言

近年来随着光通信飞速发展, 波分复用技术(WDM)已成为解决信息容量需求的有效手段. 作为波分复用中最关键的器件——阵列波导光栅(AWG)^[1]和刻蚀衍射光栅(EDG)^[2]器件是平面波导密集波分复用器件中最有发展潜力的.

在平面波导型解复用器的设计中, 不同的研究人员分别针对数值孔径、耦合效率和串扰值等因素对器件性能的影响作出了分析^[3,4].

在设计刻蚀衍射光栅中, 本文认为像差特性同样是设计中必须考虑的一项重要因素. 输入波导末端光波模场成像过程中存在的波像差, 往往会降低器件的耦合效率并增大串扰, 同时由于彗差的存在, 还会对谱形的对称性造成影响. 本文通过理论推导, 提出了一种简单而有效的计算方法, 来计算刻蚀衍射光栅对多波长光分光并成像过程中波像差对频谱响应的影响; 重点考虑球差和彗差的存在引起的谱形失称、耦合效率下降以及串扰的增大, 并证明了当存在像差(特别是球差)时, 通过简单地在输出端加

taper 结构并不能显著地改善串扰性能.

2 刻蚀衍射光栅解复用器的基本结构

如图 1 所示, 刻蚀衍射光栅器件是一个典型的 Paschen^[5]装置, 采用 Rowland 圆结构, 在同一个 Rowland 圆上沉积输入波导和输出波导阵列, 在与 Rowland 圆相切且半径是其 2 倍的圆弧上刻蚀出凹面光栅. 多路复用的光束由光纤耦合进入输入波导, 在一个较宽的平板波导层内自由散射开, 经凹面光栅闪耀, 各波长光在输出波导位置形成衍射极大, 并由相应的输出波导阵列输出^[6].

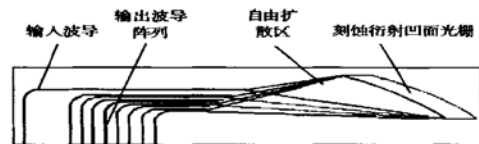


图 1 刻蚀衍射光栅解复用器件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a demultiplexer based on etched diffraction grating

* 浙江省科技计划资助项目(编号: 001101027)

宋 军 男, 1978 年出生, 博士研究生, 主要从事光纤通讯波分复用器件的模拟设计与制作.

2002-11-24 收到, 2003-02-17 定稿

3 理论推导

3.1 输入/输出波导中的基模模场分布

在实际器件设计中,我们在输入输出端均使用边长为 h 的正方形单模波导,并且在自由扩散区,平板波导芯层厚度也取为 h .

输入波导末端即平面波导自由扩散区初始端的结构如图 2 所示,此时其模场分布为简单单模平面波导中的模场分布,设输入输出波导芯层厚度为 h ,归一化结构参数 $V = k_0 h \sqrt{n_r^2 - n_c^2}$,其中 n_r 为芯层折射率; n_c 为包层折射率; k_0 为真空波矢. 相应的基模本征方程可以表示为:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\kappa h}{2}\right) = \frac{\sqrt{V^2 - (\kappa h)^2}}{f \kappa h} \quad (1)$$

对 E_{y11} 模, $f = 1$, 对 E_{x11} 模, $f = n_r^2/n_c^2$.

$$q h = \sqrt{V^2 - (\kappa h)^2}$$

其中 $\kappa = \sqrt{(k_0 n_r)^2 - \beta^2}$; $q = \sqrt{\beta^2 - (k_0 n_c)^2}$, β 为传播常数. 相应的横向模场分布为:

$$E_0(x) = \begin{cases} A \cos(\kappa x) & |x| \leq \frac{h}{2} \\ B \cos\left(\frac{\kappa x}{2}\right) \exp\left[-q\left|x| - \frac{h}{2}\right|\right] & |x| \geq \frac{h}{2} \end{cases} \quad (2)$$

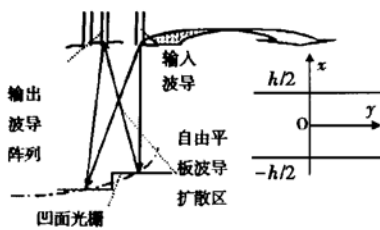


图 2 EDG 解复用器平板波导结构图

Fig. 2 Geometry of slab waveguide in EDG demultiplexer

3.2 光在自由波导区的扩散

对于输入波导的出射场向自由空间的扩散过程,可以通过基尔霍夫衍射和角谱衍射两种方法计算得到. 简单比较这两种方法,可以发现它们在处理自由扩散过程中保持了较高的一致性,但角谱衍射具有较快的速度,所以这里使用角谱衍射方法,过程如下:对得到的进入自由扩散区的初始场 E_0 作快

速傅里叶变换,其变换结果记为 $A(u) = \text{FFT}(E_0)$. 根据角谱理论,一个任意分布的空间模场的传播可以看作是角谱以平面波形式在空间各点的叠加过程,因此,根据空间任意一点,可以计算出其场值为:

$$U(x, z) = - \int_{-\infty}^{+\infty} A(u) \exp\left[ikz \sqrt{1 - (\lambda u)^2}\right] \times \exp[i2\pi(ux)] du \quad (3)$$

其中 λ 为光波中心波长,这里取 $1.55\mu\text{m}$; k 为波矢.

3.3 光在凹面光栅上的衍射成像

光在凹面光栅上的衍射过程,可以通过基尔霍夫衍射来处理,其计算公式如下^[7]:

$$E_{\text{out}}(x', z') = \frac{1}{2} \left(\frac{n}{\lambda_0}\right)^{\frac{1}{2}} \int_{\text{Gratings}} R_e \frac{U(x, z)}{\sqrt{r_0}} \times (\cos\theta_i + \cos\theta_d) \exp(-ikr_0) ds \quad (4)$$

其中 r_0 为输出 Rowland 圆上一点 (x', z') 到光栅槽面上一点 (x, z) 之间的距离; n 为芯层折射率; λ_0 为中心波长; θ_i, θ_d 分别为光栅齿面上的入射角和衍射角,积分沿光栅曲线进行. 这里反射效率 $R_e = 1$, 例如在光栅侧面镀上金属.

3.4 器件的频谱响应

当输出是单模波导时,任一输出通道的频谱相应地可以通过如下的沿输出波导端面曲线的重叠积分获得:

$$I(f) = \left| \int E_{\text{out}}(f, x') E_{\text{wg}}^*(f, x') dx' \right|^2 \quad (5)$$

其中 E_{out} 和 E_{wg}^* 分别代表像场分布和输出波导内的基模模场分布,上标* 代表复共扼运算.

由于 EDG 解复用器是一个线性色散器件,当频率改变时,像场分布会随之线性变化,即 $\Delta x' = D \Delta f$, 其中 $D = \left. \frac{dx'}{df} \right|_{x'=x'_0}$ 是刻蚀衍射光栅的空间线色散. 因此(5)式可以写成如下的卷积形式:

$$\begin{aligned} I(f_c + \Delta f) &= \left| \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\text{out}}(x' - (x'_c + D \Delta f)) \right. \\ &\quad \left. \times E_{\text{wg}}^*(x') dx' \right|^2 \\ &= \left| E_{\text{out}}(x'_c + D \Delta f) \right. \\ &\quad \left. * E_{\text{wg}}^*(x'_c + D \Delta f) \right|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

其中 f_c 和 x_c 分别是中心频率和相应的输出波导端面中心位置,符号* 代表卷积运算.

3.5 衍射光栅成像和耦合进入输出波导过程的波像差影响

理想波前和实际波前之间的相位差可以被定义为波像差 $W(x', r_0)$, 如果考虑波像差的影响, 可以对(4)式进行修正, 即

$$E_{\text{out}}(x', z') = \frac{1}{2} \left[\frac{n}{\lambda_0} \right]^{\frac{1}{2}} \int_{\text{Gratings}} R_e \frac{U(x, z)}{\sqrt{r_0}} \times (\cos \theta_i + \cos \theta_d) \exp[-ik(r_0 + W(x', r_0))] ds \quad (7)$$

进一步考虑输出模场耦合进入矩形输出波导的过程, 在输出波导端面上, 当频率相对中心频率偏移 Δf 时, 波前相对中心频率处也将偏移一定的角度 $\Delta \theta_d = \frac{2\pi mcn \Delta f}{d \cos \theta_d}$, 其中 m 为光栅衍射级; c 为真空中的光速; d 为光栅周期(刻蚀衍射光栅为变周期光栅, 因此光栅周期要根据积分点的不同, 取相应的值). 这个角度偏移将导致一个额外的波像差: $\Delta W = \Delta \theta_d x'$, 因此积分公式可以进一步修正为:

$$E_{\text{out}}(x', z') = \frac{1}{2} \left[\frac{n}{\lambda_0} \right]^{\frac{1}{2}} \int_{\text{Gratings}} R_e \frac{U(x, z)}{\sqrt{r_0}} (\cos \theta_i + \cos \theta_d) \times \exp[-ik(r_0 + W(x', r_0) + \frac{2\pi mcnx' \Delta f}{d \cos \theta_d})] ds \quad (8)$$

由于刻蚀衍射光栅是平面波导器件, 即自由扩散区横向已经被平板波导限制, 因此可以认为此时的衍射成像过程是一个二维过程. 对于二维空间的成像, 由于光束被束缚在二维的平面波导区域内, 使弧矢光线造成的影响基本可以忽略, 这样产生机制与弧矢光线离焦有关的像差, 如像散和场曲已经不占主导地位. 但由于平面波导在平行波导平面方向没有受到限制, 因此主要由子午光线离焦造成的球差和彗差便相应成为对器件频谱响应具有显著影响的像差成分. 分别可以写出光栅系统存在球差和彗差时的波像差表示形式^[8]. 定义 $a = \frac{2x'}{h}$, 为归一化的出瞳因子. 当仅存在彗差时, 彗差因子为 $\zeta_c = \frac{h}{4} \left[\frac{h}{2r_0} \right]^3$, 相应地, (8) 式中的波像差项可以表示为: $W_c(x', r_0) = \zeta_c a^3 = \frac{h}{4} \left[\frac{x'}{r_0} \right]^3$. 同样, 当仅存在球差的时候, 球差因子为 $\zeta_s = \frac{r_0}{8} \left[\frac{h}{2r_0} \right]^4$, 相应地波

像差项可以简单表达成: $W_s(x', r_0) = \zeta_s a^4 = \frac{x'^4}{8r_0^3}$.

通过像差修正后的(8)式, 可以求出考虑了像差存在时的输出模场分布, 再通过(6)式则可相应地求出在考虑了像差情况下的频谱响应.

3.6 串扰计算

定义一个通道的信号对于其他所用通道的串扰总和为:

$$Q = 10 \lg \left[\frac{1}{I(f)} \sum_{j \neq 0} I(f + j \delta f) \right]$$

其中 f 为计算通道的中心频率; δf 为频道间隔. 某一个通道的频谱响应通常只对临近通道的信号影响剧烈, 对间隔较远的通道影响基本可以忽略. 这里我们只考虑某一通道信号对左右各 3 个通道的影响, 即 $j = \pm 1, \pm 2, \pm 3$.

4 数值模拟和结果分析

在下面的数值模拟当中, 我们以硅基二氧化硅波导为例, 选择包层、芯层折射率分别为 $n_c = 1.445$, $n_i = 1.454$; 中心波长 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, 频带间隔 $\delta f = 100 \text{GHz}$, 输入输出正方形单模波导边长 $h = 6 \mu\text{m}$; 光栅衍射级 $m = 16$, 空间线色散 $D = 0.25 \mu\text{m}/\text{GHz}$.

4.1 理论分析的验证及彗差引起谱形失称

通常情况下的刻蚀衍射光栅解复用器频谱响应为高斯形, 但是当衍射成像过程中存在彗差时, 由于 Rowland 像平面为一系列不对称弥散斑的叠加, 最终会造成频谱响应对称性的改变.

为了验证以上理论分析的正确性, 首先通过两点法^[9]设计光栅, 使得输出端的聚焦点不惟一, 即经过刻蚀衍射光栅后的光束, 随机聚焦在以输出波导为轴线的不同偏轴位置. 此时可以做出其频谱响应曲线, 如图 3 所示. 其中实线代表没有像差, 即经过刻蚀衍射光栅以后, 所有光线都聚焦在输出波导端的频谱响应; 点划线代表使用两点法模拟彗差产生以后的频谱响应. 另外, 通过 3.5 节的分析, 可以求出在彗差时的频谱响应曲线, 如图 4 所示. 由图可见, 当彗差存在时, 频谱响应明显失称, 如果彗差严重还可能造成信号失真. 比较图 3 和图 4 可以看出, 两条频谱响应曲线十分相似, 说明使用前面的理论分析, 的确可以模拟彗差存在时候的频谱特性.

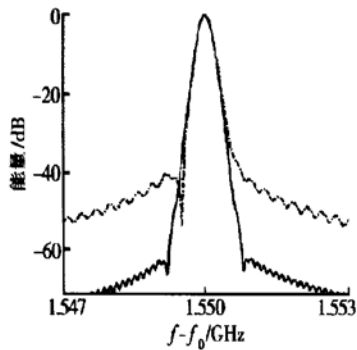


图3 两点法设计产生彗差时的频谱响应

Fig. 3 Spectral responses when a coma exists using a 2-stigma method

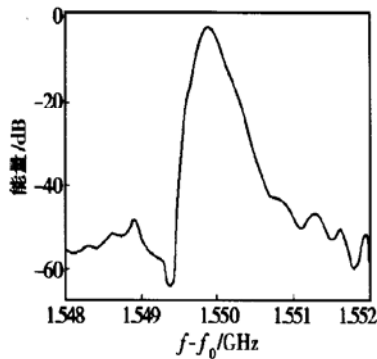


图4 存在彗差时的频谱响应

Fig. 4 Spectral responses when a coma exists

相对于彗差而言,球差对谱形的影响就没有那么剧烈,除了后面将要分析的对耦合效率和串扰造成影响以外,并没有造成明显的谱形失称。

4.2 像差存在降低器件耦合效率

对仅存在球差、仅存在彗差以及无像差理想成像这三种情况的频谱响应做出了分析,计算了它们在不同波长处的衍射效率曲线,结果如图5所示。其中实线为理想的没有像差时的耦合效率随波长的变化曲线,点划线和虚线分别为仅存在球差和仅存在彗差时的耦合效率随波长的变化曲线。从图中可以看出当引入了像差以后耦合效率会明显下降。比较两种像差对耦合效率造成的影响,可以看出仅存在彗差时具有更低的耦合效率。

4.3 像差存在对器件串扰特性的恶化

同4.2节相似,我们分别对三种情况下器件的

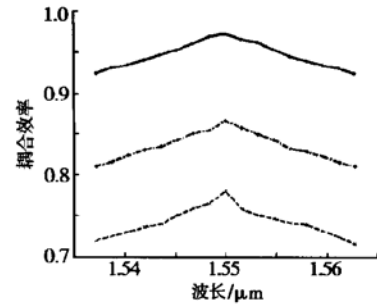


图5 耦合效率随波长的变化关系曲线

Fig. 5 Coupling efficiency versus wavelength

串扰特性做了分析比较,并做出了串扰随波长的变化关系曲线,如图6所示,其线形与像差种类的对应关系也与图5相同。从图中可以看到当引入了像差后,串扰明显增大。比较两种像差,可以发现当仅考虑球差(点划线)比仅考虑彗差(虚线)具有更差的串扰特性。另外从图中也可以看到,在远离中心波长以后,串扰的影响也会更加剧烈。这主要是由于光栅设计是以中心波长为基准展开的。

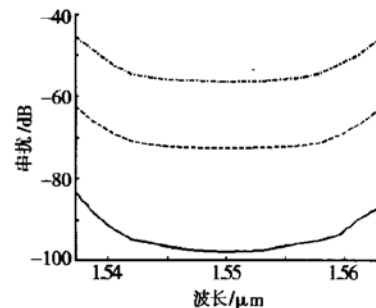


图6 串扰随波长的变化关系曲线

Fig. 6 Crosstalk versus wavelength

对于平面波导波分复用器件,通过在输出端使用 taper 波导的方法,通常可以减小插损,降低串扰。下面将考虑在存在波像差的情况下,输出端使用 taper 结构对器件串扰特性的影响。同上面的分析方法一样,分别对仅存在球差、仅存在彗差以及理想成像三种情况做出分析。设 H 为 taper 波导初始端孔径,定义相对孔径 $M = H/h$ 。如果对不同 M 选择同样的波导渐变斜率,则可以计算出中心波长对临近通道的串扰随 M 的变化曲线,结果如图7所示。从图中可以看出,不存在像差的理想成像情况,输出端使用 taper 结构可以明显改善串扰特性,但当存在像差时,效果已经不再明显。对通道数较多的密集波分复用系统, -60dB 左右的串扰值是需要保证的^[10],但

是当像差存在,特别是球差存在时,这样的串扰要求很难保证.因此,波分复用器件要想获得较好的串扰特性,必须从根本上抑制球差,而不能单纯在输出端使用 taper 波导结构.

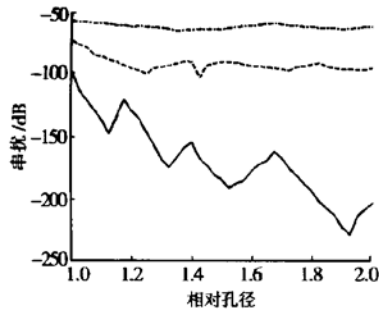


图 7 串扰随相对孔径的变化曲线

Fig. 7 Crosstalk versus relative aperture

5 结论

本文通过对刻蚀衍射光栅平面波导解复用器的频谱响应过程中存在的波像差,在数值上给出了一种简单方便的计算方法.通过数值模拟,分析了球差、彗差这两种平面波导波分复用器衍射成像过程中的主要像差对器件谱形、耦合效率以及串扰的影响.指出彗差存在会造成谱形失称,明显降低耦合效率;而球差存在则会明显地增加串扰.另外证明了当球差存在时,即使输出波导端使用 taper 结构也不能从根本上改善器件的串扰.

参考文献

- [1] Ou Haiyan, Lei Hongbing, Yang qinqing, et al. Arrayed waveguide layout for AWG design. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21: 115
- [2] Koteles E. Integrated planar waveguide demultiplexers for high density WDM application. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1999
- [3] Lei Hongbing, Ou Haiyan, Yang Qinqing, et al. Analysis and design of array aperture for phased-array waveguide grating mulit/demultiplexer. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21: 359[雷红兵, 欧海燕, 杨沁清, 等. 阵列波导光栅复用/解复用器光栅孔径对器件性能影响的值分析. 半导体学报, 2000, 21: 359]
- [4] Ou Haiyan, Lei Hongbing, Yang Qinqing, et al. Simple method for design 1×8 arrayed waveguide grating multidemultiplexers. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21: 798[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件设计的一种简单方法. 半导体学报, 2000, 21: 359]
- [5] Scherer A, Leblanc H P, et al. Monolithic InP/InGaAsP/InP grating spectrometer for the 1.48 ~ 1.56 μ m wavelength range. Appl Phys Lett, 1991, 58(18): 1949
- [6] Gini E, Hunziker W, Melchior H. Polarization independent InP WDM multiplexer/demultiplexer module. IEEE J Lightwave Tech, 1998, 16(4): 625
- [7] He J J, Delage A. Sources of crosstalk in grating based monolithically integrated waveguide demultiplexers. Proceedings of SPIE, 1998, 3491: 593
- [8] Born M, Wolf E. Principles of optics. London: Pergamon, 1970
- [9] Reinhard M, Connerlius C. On the theory of planar spectrographs. IEEE J Lightwave Tech, 1992, 10(12): 2017
- [10] Hill A M, Carter S, Amitage J, et al. A scaleable and switchless optical network structure, employing a single 32×32 free-space grating multiplexer. IEEE Photonics Technol Lett, 1996, 8(4): 569
- [1] Ou Haiyan, Lei Hongbing, Yang qinqing, et al. Arrayed

Analysis of Aberration Characteristics for Etched Diffraction Grating*

Song Jun, Mei Weiquan, Wen Hongqiao and He Sailing

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

Abstract: A simple and effective method for calculating the wave aberration for an etched diffraction grating (EDG) demultiplexer is presented. The design is analyzed and demonstrated using a Kirchhoff diffraction integral, an angular spectrum analysis, and a fast Fourier transform method. It is shown that the symmetry of the spectral response and the coupling efficiency will be deteriorated when the coma appears during the diffraction and imaging. The spherical aberration will result in a larger crosstalk as compared to the coma. It is also shown that the crosstalk characteristic can not be improved better by connecting a tapered waveguide at the entrance of each output waveguide of the demultiplexer.

Key words: etched diffraction grating; wavelength division multiplexing; wave aberration; spherical aberration; coma; crosstalk; coupling efficiency

EEACC: 4130; 4140

Article ID: 0253-4177(2003)10-1103-06

* Project supported by Science and Technology Plan of Zhejiang Province (No. 001101027)

Song Jun male, was born in 1978, PhD candidate. His research activities are in design, simulation, and fabrication of integrated wavelength division multiplexers.

Received 24 November 2002, revised manuscript received 17 February 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics