

低串扰平顶型刻蚀衍射光栅解复用器的设计*

宋 军 石志敏 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: 介绍了一种低串扰、频谱响应平坦化的刻蚀衍射光栅(EDG)解复用器的机理与设计方法, 设计带有预整形输入的优化的多模干涉(MMI)结构. 该设计采用了广角束传播方法(BPM)、基耳霍夫衍射理论以及模式传输理论等方法, 给出一个优化的预整形渐变波导结构, 以获得更陡的输出场边缘, 使用 MMI 结构, 获得了平坦的频谱响应, 设计结构还获得了相对较低的色散值.

关键词: 刻蚀衍射光栅; 频谱平坦化; 串扰; 色散

EEACC: 4130; 4140

中图分类号: TN814.6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)02-0195-05

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.

通常 WDM 器件的频谱响应都是高斯型的, 任何波长漂移都会引起探测功率急剧下降. 因此在设计器件的时候, 通常需要将高斯频谱响应转化为平坦型频谱响应. 这样一方面可以放宽光通信系统对于光源波长控制的要求, 同时可以克服由于环境温度改变、器件材料老化以及器件刻蚀过程中存在的公差对器件性能造成的影响, 另外可以保证多器件串联不会对器件系统性能造成大的改变.

常用于 DWDM 器件频谱平坦化的方法主要有多模场输入、多模波导输出、使用双罗兰(Rowland)圆以及双光栅结构、最优化理论调节系统相位造成频谱微扰等, 其中利用多模干涉(MMI)结构达到多像叠加输入实现频谱响应平坦化是应用最广泛、结构最简单的方法之一. 但是, 通常应用 MMI 结构得

到的平坦化频谱响应时, 会带来大的串扰、带通纹波和插损等不利因素.

本文对 MMI 结构用于刻蚀衍射光栅解复用器频谱平坦化做了进一步的改进, 提出了使用带有预整形输入的 MMI 可以有效改善平坦化效果, 降低串扰的观点, 并在考虑器件综合性能的前提下, 给出了性能相对优越的优化 MMI 结构设计方法.

2 平顶低串扰刻蚀衍射光栅基本结构

如图 1 所示, 刻蚀衍射光栅器件是一个典型的 Paschen^[3]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^[4].

输入波导末端有一带有模场预整形的 MMI 结构, 它由一段长为 L_1 的渐变(taper)波导和一段长为 L_2 的多模矩形波导组成.

* 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, 主要从事光纤通信波分复用器件的模拟设计与制作.

2003-02-27 收到

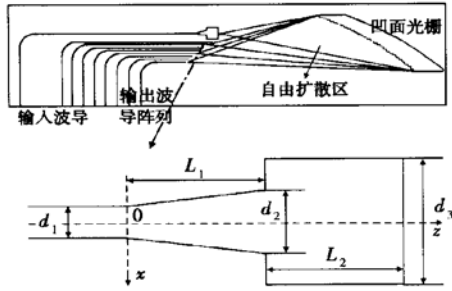


图 1 低串扰平顶型刻蚀衍射光栅解复用器件示意图
Fig.1 Schematic diagram of a demultiplexer based on an etched diffraction grating with flat passband and low crosstalk

3 理论推导

3.1 输入/输出波导中的基模模场分布

首先利用广角束传播方法(BPM)^[5,6]来模拟计算出场在输入波导及带有模场预整形的多模干涉区的传输过程,从而得到双像叠加输出的初始场分布,把它表示为 E_0 .

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,可以使用角谱衍射方法分析,其过程如下:

对得到的进入自由扩散区的初始场 E_0 做快速傅里叶变换,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其角谱以平面波形式在空间各点的叠加过程.因此,在空间任意一点,可以计算出其场值为:

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

其中 λ 为光波中心波长; 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]:

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

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_o 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 $R_c = 1$,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响应可以通过如下的沿着输出波导端面曲线的重叠积分获得.

$$I(f) = \left| \int E_{\text{out}}(f, x') E_{\text{wg}}^*(f, x') dx' \right|^2 \quad (3)$$

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性色散.因此(3)式可以写成如下的卷积形式:

$$I(f_c + \Delta f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{out}}(x' - (x'_c + D\Delta f)) E_{\text{wg}}^*(x') dx' \right|^2 = |E_{\text{out}}(x'_c + D\Delta f) * E_{\text{wg}}^*(x'_c + D\Delta f)|^2 \quad (4)$$

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 器件的串扰和色散特性

定义一个通道的信号对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 $j = \pm 1, \pm 2$ 和 ± 3 .

定义 $\tau = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \times \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}$, 则色散大小可以表示为^[8]

$$D = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{1}{2\pi c} \left[2\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} + \lambda^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \lambda^2} \right] \quad (5)$$

其中相位响应 $\Phi(f)$ 由(6)式求得.

$$E(f_c + \Delta f) = E_{\text{out}}(x'_c + D\Delta f) * E_{\text{wg}}^*(x'_c + D\Delta f) = E_R(f) + iE_I(f) = |E(f)| \exp[-i\Phi(f)] \quad (6)$$

由于计算得到的相位响应 $\Phi(f)$ 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(5)式如下:

$$D_i = \frac{(2\lambda\Delta\lambda + \lambda^2)\Phi_{i+1} - 2\lambda(\Delta\lambda + \lambda)\Phi_i + \lambda^2\Phi_{i-1}}{-2\pi c \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2} \quad (7)$$

通过(7)式可以计算得到在中心波长附近的色散大小,从而可以更方便地考察色散同强度调制间的关系。

4 设计过程及结果分析

如图 1 所示,使用长度为 L_1 的 taper 波导结构,使得由输入波导输出的模场在进入多模干涉区之前有一个预展宽.使用了这一结构,串扰值相对于传统设计大幅度降低.随着 d_2 的增大,器件的串扰会明显降低,但是对应的插入损耗也会明显上升.为了优化设计,必须综合考虑插入损耗及串扰这两个参数,合理选择 d_2 的大小。

作为一个实例,这里选用硅基二氧化硅波导,芯层折射率 $n_r = 1.454$,包层折射率 $n_c = 1.445$,芯层厚度为 $6\mu\text{m}$,中心波长 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$,频带间隔 $\Delta f = 100\text{GHz}$,输入输出波导宽度为 $6\mu\text{m}$,即 $d_1 = 6\mu\text{m}$ 。

要想使输入波导末端的模场在进入多模干涉区之前有一个预展宽,除了基模以外,必须要求有一个高阶模出现.同时考虑到插入损耗要小,以及加工精度的因素,这里令 $d_2 = 8\mu\text{m}$,此时恰好有两个模在 taper 波导中能够被激励出来.通过广角 BPM 方法,可以模拟 taper 波导末端模场随长度 L_1 的变化,如图 2 所示.数值结果显示当 $L_1 = 356\mu\text{m}$ 时, taper 波导末端模场分布具有最陡的下降沿,这可以使最终的频谱响应具有最低的串扰值。

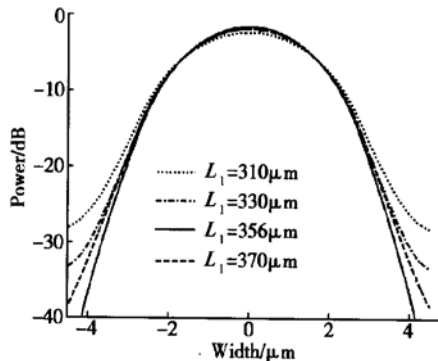


图 2 广角 BPM 计算预整形后模场分布随 L_1 的变化
Fig. 2 WA-BPM simulation results for the field distribution at the end of the reshaping taper for various lengths of the taper.

如果 L_1 的值过小,高阶模很可能来不及被激励.另一方面,如果 L_1 的值过大,这一渐变过程则非常缓慢,最终 taper 波导将接近于一个宽度为 $8\mu\text{m}$ 的直波导,如图 3 所示.其中实线为优化的 taper 波导末端模场分布,虚线和点划线分别为宽度为 $6\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}$ 的直波导内的模场分布.结合图 2 和图 3,可以发现对于一定的 d_2 值,随着 L_1 的增大,其末端模场边沿也会先变陡后趋于平滑,在这过程中,必然存在一个最佳值,此时模场具有最陡的边沿.但当 L_1 进一步增大,其最终模场分布将趋向于宽度为 $8\mu\text{m}$ 的直波导内的模场分布。

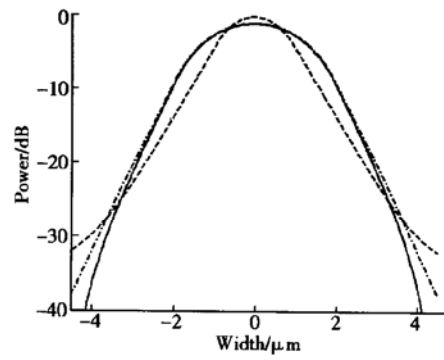


图 3 优化的 taper 波导末端模场与对应的直波导模场分布比较

Fig. 3 Field distribution (solid line) at the of optimized taper and fundamental mode profiles in straight waveguides with widths of $6\mu\text{m}$ (dashed line) and $8\mu\text{m}$ (dash-dotted line).

为了便于讨论,有必要先对平坦化性能优劣提供一个尺度,在此,本文基本沿用 Dragone^[9]做出的有效带宽比 R 的定义,但为了更好地衡量串扰特性,在这里使用 1dB 和 31dB 来定义:

$$R = \frac{2W_{1\text{dB}}}{W_{1\text{dB}} + W_{31\text{dB}}} \quad (8)$$

可以知道,对于理想的矩形频谱响应, $R = 1$,因此,最终频谱响应的有效带宽比越接近于 1,也就越接近于理想的矩形响应。

另外,为了衡量峰值附近平坦化程度,再引入带通纹波的概念,其大小等于在光通信 ITU 窗口 $[-12.5\text{GHz}, 12.5\text{GHz}]$ 范围内,频谱响应的最大变化量。

对于一定的 d_3 ,根据自映像原理^[10],可以在 MMI 输出面上得到两个像,这两个像分开距离 $x = W_e/2$, W_e 为等效宽度:

$$W_c = d_3 + \frac{\lambda}{\pi \sqrt{n_r^2 - n_c^2}} \left(\frac{n_c}{n_r} \right)^{2t}, \quad t = \begin{cases} 0 & \text{TE 模} \\ 1 & \text{TM 模} \end{cases} \quad (9)$$

其中后一项是由古斯-汉森位移引起的。

如果要在输出位置得到两个像叠加来实现平坦化,那么根据多模干涉的自成像原理,应选择的输出长度为:

$$L_{\text{MMI}} = \frac{3}{8}L_\pi, \quad L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{4n_r W_c^2}{3\lambda} \quad (10)$$

实际设计中发现,最佳自映像位置并不严格满足(10)式,而在求得值附近波动.因此,对于一定的 d_3 ,可先通过(10)式求得 L_{MMI} ,再使用广角 BPM 方法在其附近小范围内搜索,可以求得对应的最佳自映像长度,即 L_2 大小.确定了这一系列结构参数之后,可以根据理论推导部分的叙述,最终计算求得器件的频谱响应,以及串扰、插入损耗和色散等性能参数。

对于 d_3 的确定,可以进行一个搜索,做有效带宽比随 MMI 区宽度的变化关系曲线,如图 4 所示,可见, d_3 存在一个最佳值,此时对应的有效带宽比具有最大值.使用前面提到的波导结构,可以求得在

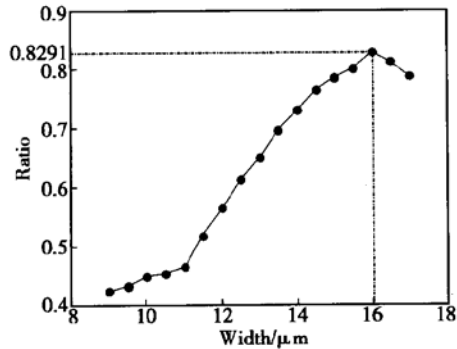


图 4 有效带宽比随 MMI 区宽度变化关系曲线

Fig. 4 Effective passband ratio as the width of the MMI region

$d_3 = 16\mu\text{m}$ 附近,具有最大的有效带宽比 $R = 0.8291$.但此时由于输入波导末端展宽过大,使得插入损耗也会成倍增加,因此,实际设计可以根据需要,在损耗允许的前提下,合理选择 d_3 的大小。

作为一个计算实例,这里选取 $d_3 = 13.5\mu\text{m}$,相应地可以求得用广角 BPM 优化后的 MMI 区长度 $L_2 = 158.2\mu\text{m}$.此时带通纹波约为 0.1dB,插入损耗约为 3.5dB,其对应的频谱响应曲线和色散响应曲线分别如图 5 和图 6 所示.由图 5 中可以看到,经过

优化设计的器件不但获得了非常平坦的频谱响应,而且其频谱响应曲线边缘也非常陡,从而获得了非常低的串扰值,这是通常的设计无法实现的.另外从图 6 可以看到,此时器件对应的色散在带宽范围内也维持了相对较低的水平,可以说使用本文的设计可以获得综合性能优越的结构。

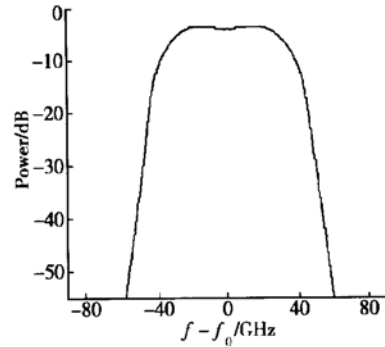


图 5 平坦化频谱响应曲线

Fig. 5 Flattened spectral responses

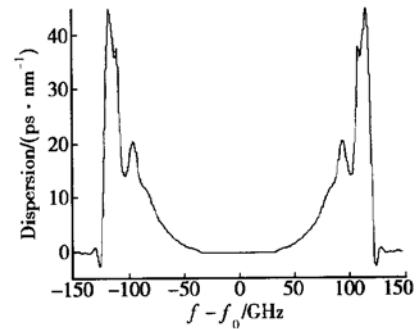


图 6 器件色散特性曲线

Fig. 6 Chromatic dispersion characteristics

5 结论

本文对 MMI 结构用于刻蚀衍射光栅解复用器频谱平坦化做了进一步的改进,提出并深入分析了使用带有预整形输入的 MMI 可以有效改善平坦化效果、大大降低器件的串扰.给出了相应的预整形 taper 波导变化速度的优化方法,以及 MMI 区宽度、长度的确定方法.在考虑器件综合性能的前提下,给出了一个串扰低,色散小,插入损耗相对小,高平坦频谱响应的优化 MMI 结构设计实例。

需要说明的是本文提供的设计方法除了可用于刻蚀衍射光栅器件外,同样也可以用于阵列波导光栅实现平坦化频谱的性能优化。

参考文献

- [1] Ou Haiyan, Lei Hongbing, Yang Qinqing, et al. Simple method for design 1×8 arrayed waveguide grating multi/demultiplexers. *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/解复用器设计的一种简单方法. *半导体学报*, 2000, 21: 789]
- [2] Koteles E. Integrated planar waveguide demultiplexers for high density WDM application. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham USA, Mar, 1999
- [3] Soole J B D, 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
- [4] Gini E, Hunziker W, Melchior H. Polarization independent InP WDM multiplexer/demultiplexer module. *J Lightwave Technol*, 1998, 16(4): 625
- [5] Hadley G. Multistep method for wide-angle beam propagation. *J Opt Soc Am*, 1992, 17(24): 1743
- [6] Rappaport C M. Perfectly matched absorbing boundary conditions based on anisotropic lossy mapping of space. *IEEE Microwave Guided Wave Lett*, 1995, 5(3): 90
- [7] He J J, Delage A. Sources of crosstalk in grating based monolithically integrated waveguide demultiplexers. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3491: 593
- [8] Kikuchi N. Adaptive chromatic dispersion compensation using higher order polarization-mode dispersion. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2001, 13(10): 1115
- [9] Dragone C. Efficient techniques for widening the passband of a wavelength router. *J Lightwave Technol*, 1998, 16(10): 1895
- [10] Soldano L, Pennings E. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(4): 615

A Pre-Shaped MMI Input Structure in Etched Diffraction Grating for Flat-Top Spectral Response with Low Crosstalk*

Song Jun, Shi Zhimin and He Sailing

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

Abstract: A flat-topped planar waveguide demultiplexer with low crosstalk is designed. A multimode interference (MMI) section with a reshaping taper is connected at the end of the input waveguide. An etched diffraction grating (EDG) demultiplexer is considered as a design example. A wide-angle beam propagation method (BPM), the Kirchhoff diffraction theory, and the mode propagation analysis are used in the simulation. The field distribution at the end of the taper is reshaped optimally to have sharp transitions. The designed EDG demultiplexer has an excellent flat-topped spectral response and a very low crosstalk, and a low chromatic dispersion characteristic.

Key words: etched diffraction grating; flattened spectral response; crosstalk; chromatic dispersion

EEACC: 4130; 4140

Article ID: 0253-4177(2004)02-0195-05

* 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 27 February 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics