

文章编号: 0253-2239(2005)11-1543-6

一种基于斜光栅辅助的非对称耦合器型 光分插复用器*

李 明 吴亚明

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 提出了一种基于斜光栅辅助的非对称耦合器型光分插复用器。运用复合波导的三维正交模式,对器件的三种可能的结构进行了理论分析,选出粗波导光栅型结构。利用耦合模理论,模拟了斜光栅的耦合特性并对其倾斜角进行优化设计。通过回波峰值设计法,将器件的工作波长放在波分复用信道之内,回波峰值波长放在波分复用信道之外,使得器件的性能大有提高。模拟结果表明器件的串扰可达到 -30 dB,回波损耗可达到 -25 dB。同时,器件的关键工艺容差较大,易于批量化生产。当斜光栅的倾斜角度在 2.5° 到 4.5° 之间时,器件的串扰低于 -28 dB,回波损耗低于 -22 dB。

关键词: 集成光学; 光分插复用器; 正交模式; 回波峰值波长; 斜光栅

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Design of an Optical Add-Drop Multiplexer Based on Grating-Assisted Asymmetric Coupler

Li Ming Wu Yaming

(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract: The design of an optical add-drop multiplexer (OADM), using an asymmetric coupler and a slanted Bragg grating, is presented. By employing 3-D normal modes, theoretical analysis is made over three possible structures to choose the grating-on-wide-waveguide one. Through coupled-mode theory, the simulation of the coupling properties of the slanted grating is given to optimize its tilt angle. Moreover, by utilizing the back-reflection-peak-wavelength method, the wavelength to be added and dropped is located within the wavelength division multiplexing (WDM) signal channels while the peak wavelengths of the reflective spectrum are located outside of the WDM signal channels, improving the performance of the proposed device greatly. Simulations show that the device has a crosstalk about -30 dB and a return loss about -25 dB. Meanwhile, the increase in key process tolerance enables mass production of the device easier. The device has a crosstalk below -28 dB and a return loss below -22 dB with the tilt angle of the slanted grating fluctuating from 2.5° to 4.5° .

Key words: integrated optics; optical add-drop multiplexer; normal modes; back-reflection-peak-wavelength; slanted grating

1 引 言

光分插复用器(OADM)是波分复用系统(WDM)的核心设备之一,其中集成式光分插复用器由于其结构紧凑、可与其他光器件集成以及可批量化生产的特点而备受瞩目。有很多种集成式光分

插复用器器件结构,如定向耦合器(Directional coupler, DC)型^[1]、马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)型^[2]、多模干涉仪(Multimode interferometer, MMI)型^[3]、零耦合器(Null coupler, NC)型^[4]、相移光栅(Phase shift

* 国家 863 计划(2002AA312261)资助课题。

作者简介: 李 明(1978~),男,江西九江人,博士研究生,主要从事集成光学和微细加工方面的研究工作。

E-mail: mingli@mail.sim.ac.cn

收稿日期: 2004-10-18; 收到修改稿日期: 2005-05-23

grating, PSG) 型^[5] 和对称耦合器 (Symmetric coupler, SC) 型^[6]。它们对制作工艺的误差都很敏感,如定向耦合器型、马赫-曾德尔型、多模干涉仪型和相移光栅型光分插复用器器件对光栅与波导的相对位置误差很敏感,零耦合型和对称耦合器型光分插复用器器件对斜光栅的倾斜角误差很敏感,这限制了它们在批量化生产中的应用。

Erdogan^[7] 运用二维波导模式对基于垂直光栅辅助的非对称双波导的光分插复用器进行了分析,器件的制作工艺简单,但其性能还有待提高,器件的回波约为 -10 dB。

本文提出了一种基于斜光栅辅助的非对称耦合器型光分插复用器,并运用复合波导的三维正交模式进行理论分析,选出粗波导光栅结构。通过耦合模理论,模拟了斜光栅的耦合特性以优化器件的参量。并且运用回波峰值设计法^[8],设计非对称双波导的宽度和间距,将器件的工作波长放在波分复用信道之内,回波峰值波长放在波分复用信道之外,使得器件的性能大有提高。与其他方案相比,非对称耦合器制作简单,性能稳定,工艺容差较大;斜光栅与波导的相对位置没有要求,它的倾斜角度的容差也较大,可适应批量化生产的需要。

2 光分插复用器的工作原理

基于斜光栅辅助的非对称耦合器型光分插复用

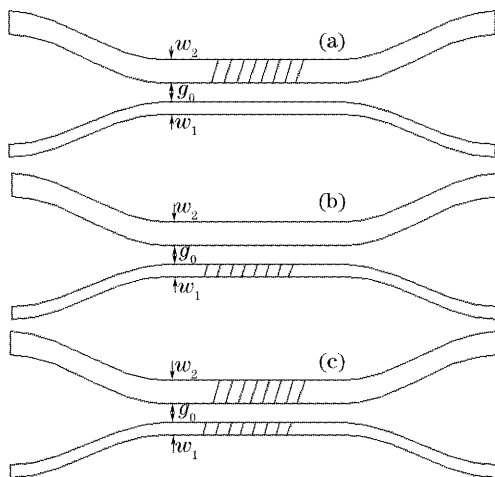


图 1 光栅辅助的非对称双波导的光分插复用器。

(a) 粗波导光栅型, (b) 细波导光栅型, (c) 双波导光栅型
Fig. 1 Sketch of three kinds of OADMs based on grating-assisted asymmetric coupler. (a) Grating-on-wide-waveguide type, (b) grating-on-thin-waveguide type, (c) grating-on-dual-waveguide type

器有两种类型:单波导光栅型和双波导光栅型。因为非对称耦合器由粗、细两根单模波导组成,所以单波导光栅型又分为粗波导光栅型和细波导光栅型。器件的三种结构如图 1 所示,细波导宽 w_1 ,粗波导宽 w_2 ,两波导由远处逐渐靠近,在相距为 g_0 时平行,经过耦合部分后又逐渐远离,整个器件是轴对称图形。在耦合部分,两根平行的波导作为一个复合波导进行分析,它有两种正交模式^[9]存在:基模 TE_0 与一阶模 TE_1 。单波导光栅型与双波导光栅型光分插复用器器件的工作原理是相同的。波分复用信号从细波导 (Input 端口) 输入,经过靠近部分后,在耦合部分激发的主要是 TE_1 。经过斜光栅的耦合作用后,满足布拉格条件的波长(工作波长)的波分复用信号由 TE_1 转化成反向传播的 TE_0 ,最后由粗波导 (Drop 端口) 下载;非工作波长的波分复用信号不受影响的通过耦合部分,最后由细波导 (Output 端口) 输出。在上载波分复用信号时,从粗波导 (Add 端口) 输入,原理是相似的。

3 光分插复用器的设计

基于斜光栅辅助的非对称耦合器型光分插复用器的性能主要由两个方面的因素决定:非对称耦合器在耦合部分的串扰特性和斜光栅的模式耦合特性。波分复用信号由 Input 端口输入,经过非对称耦合器的靠近部分,在耦合部分不仅会激发出 TE_1 ,同时还会激发出 TE_0 (串扰)。其中,工作波长的 TE_0 就会在斜光栅作用下转化成反向传播的 TE_1 ,从 Input 端口输出,从而影响器件的回波损失 (Return loss)。同时,耦合部分的 TE_1 经过斜光栅时会发生两种反向耦合作用:互耦合作用与自耦合作用。如果互耦合作用不够强,工作波长的 TE_1 没有被完全转化成反向的 TE_0 ,剩余部分就会从 Output 端口输出,从而影响器件的串扰 (Crosstalk)。自耦合作用使得 TE_1 转化成反向的 TE_1 ,并在某个非工作波长处形成回波峰值,从 Input 端口输出,从而影响器件的回波。所以,优化器件性能也主要有两个方面:降低非对称双波导的平行部分的串扰,抑制 TE_0 的激发;优化斜光栅的耦合特性,增大互耦合作用以降低器件串扰,减小自耦合作用以降低器件回波。此外,根据回波峰值波长设计法,将器件的工作波长放在波分复用信道之内,回波峰值波长放在波分复用信道之外,则会大大降低器件的回波,提高器件的工艺容差。

3.1 非对称耦合器的设计

非对称耦合器的结构如图 2 所示。在靠近部分,两根波导以绝热形式相互靠近,没有入射光转化成高阶模辐射掉,全部能量转化成耦合部分的 TE_0 与 TE_1 。若 TE_0 的能量为 E_0 , TE_1 的能量为 E_1 , 则非对称耦合器的串扰为

$$C_T = 10 \lg[(E_0/E_1)^2], \quad (1)$$

它主要由两个方面决定:耦合部分的双波导参量,如 w_1 、 w_2 及 g_0 ; 靠近部分的长度 L_1 及两根波导的距离函数 $g(z)$ 。一般,随着双波导不对称性 w_2/w_1 增大,间距 g_0 增大,靠近部分长度 L_1 增大, E_0 会减小,则非对称耦合器的串扰 C_T 会越小。

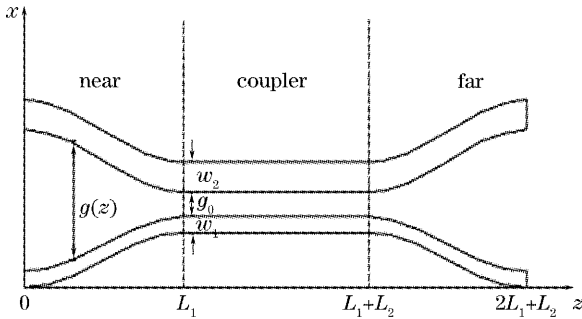


图 2 非对称耦合器示意图

Fig. 2 Structure of asymmetric coupler

假设器件制作在硅基二氧化硅片上,波导、包层折射率分别为 $n_t = 1.455$, $n_c = 1.444$, 芯层厚度为 $h = 5.5 \mu\text{m}$, $w_1 = 1.6 \mu\text{m}$, $w_2 = 5.4 \mu\text{m}$, $g_0 = 3 \mu\text{m}$, $g(0) = 35 \mu\text{m}$, $L_1 = 3000 \mu\text{m}$, 距离为余弦函数 $g(z) = g_0 + [g(0) - g_0][1 + \cos(\pi \cdot z/L_1)]/2$ 。实验室购买了 BPM-CAD^[10] 软件,它是基于有限差分光束传播法(FD-BPM)数值算法的商业模拟软件。BPM-CAD 软件模拟结果表明在波长 1530~1570 nm 的范围内,非对称耦合器的串扰为 $C_T \leq -35 \text{ dB}$ 。所以,器件的性能主要取决于斜光栅的耦合特性。

3.2 斜光栅的设计

在三种类型的光分复用器器件的设计中,斜光栅的设计方法是一致的,我们以双波导光栅型器件为例。斜光栅的结构如图 3,周期为 Λ , 倾斜角为 θ 。入射光传播到耦合部分时, TE_1 在斜光栅作用下,同时发生反向互耦合作用与反向自耦合作用。上载、下载的波分复用信号波长为发生互耦合作用的工作波长 λ_c , 它满足布拉格条件:

$$\beta_0(\lambda_c) + \beta_1(\lambda_c) = 2\pi/\Lambda, \quad (2)$$

其中 β_0 、 β_1 分别为模式 TE_0 、 TE_1 的传播常量。器件

的回波峰值波长是由自耦合作用引起的。其中 Input 端口的回波峰值波长为 λ_1 , Add 端口的回波峰值波长为 λ_0 , 它们分别满足布拉格条件:

$$\beta_1(\lambda_1) = \pi/\Lambda, \quad \beta_0(\lambda_0) = \pi/\Lambda, \quad (3)$$

由上式可知,通过设计非对称耦合器的耦合部分参量,如 w_1 、 w_2 与 g_0 , 可将 λ_c 放在波分复用信道之内, λ_1 和 λ_0 放在波分复用信道之外,这样器件的回波将大大降低。

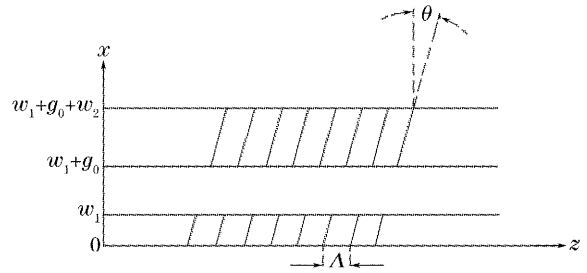


图 3 斜光栅的结构示意图

Fig. 3 Structure of slanted grating

假设器件工作在频率间隔为 200 GHz 的波分复用系统内, $\Delta\lambda_c = 1.6 \text{ nm}$, 根据回波峰值波长设计法^[8], 必须满足的条件为

$$WD_1 = \lambda_c - \lambda_1 = (2s - 1) \times 0.8 \text{ nm}, \quad (4a)$$

$$WD_0 = \lambda_0 - \lambda_c > 0.1 \text{ nm}, \quad (4b)$$

$$(s = 1, 2, \dots)$$

若 $h = 5.5 \mu\text{m}$, $w_1 = 1.6 \mu\text{m}$, $w_2 = 5.4 \mu\text{m}$, $g_0 = 3 \mu\text{m}$, 则当工作波长为 $\lambda_c = 1550 \text{ nm}$ 时, $\lambda_1 = 1547.6 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1552.4 \text{ nm}$, 即 $WD_1 = 3 \times 0.8 \text{ nm}$, $WD_0 > 0.1 \text{ nm}$ 。它满足了回波峰值波长设计法的要求。

在斜光栅作用下的互耦合系数 K_{01} 与自耦合系数 K_{11} 、 K_{00} 分别为

$$K_{01} = \frac{\omega}{4} \epsilon_0 2n_t \times$$

$$\iint_{\sigma} \Delta n_{UV} \psi_0 \psi_1 \exp\left(-j \frac{2\pi x}{\Lambda} \tan \theta\right) dx dy, \quad (5a)$$

$$K_{11} = \frac{\omega}{4} \epsilon_0 2n_t \times$$

$$\iint_{\sigma} \Delta n_{UV} \psi_1 \psi_1 \exp\left(-j \frac{2\pi x}{\Lambda} \tan \theta\right) dx dy, \quad (5b)$$

$$K_{00} = \frac{\omega}{4} \epsilon_0 2n_t \times$$

$$\iint_{\sigma} \Delta n_{UV} \psi_0 \psi_0 \exp\left(-j \frac{2\pi x}{\Lambda} \tan \theta\right) dx dy, \quad (5c)$$

其中 σ 为光栅区域, ω 为波分复用光信号的角频率,

Δn_{UV} 为光致折射率变化, ψ_0, ψ_1 分别为 TE_0 与 TE_1 的主电场分布。对于双光栅型、粗波导光栅型与细波导光栅型, 光栅区域分别为 $\{[0, w_1] \cup [w_1 + g_0, w_1 + g_0 + w_2]\} \times [0, h], [w_1 + g_0, w_1 + g_0 + w_2] \times [0, h]$ 与 $[0, w_1] \times [0, h]$ 。将光栅区域分成 $m \times n$ 个子区域, 若 m, n 足够大, 子区域足够小, 以至在每个子区域中的电场可近似认为不变, 则耦合系数的离散化表示为

$$K_{pq} = \frac{\omega}{4} \epsilon_0 2n_t \sum_m \sum_n \Delta n_{UV} \psi_p \psi_q \times \exp\left(-j \frac{2\pi x}{\Lambda} \tan \theta\right) \Delta x \Delta y, \quad (6)$$

($p, q = 0, 1$)

假设以上波导的各参量不变, 先利用 BPM-CAD 软件中的 ADI^[11] 方法对波导结构进行数值分析, 解出 ψ_0 与 ψ_1 , 如图 4 所示。

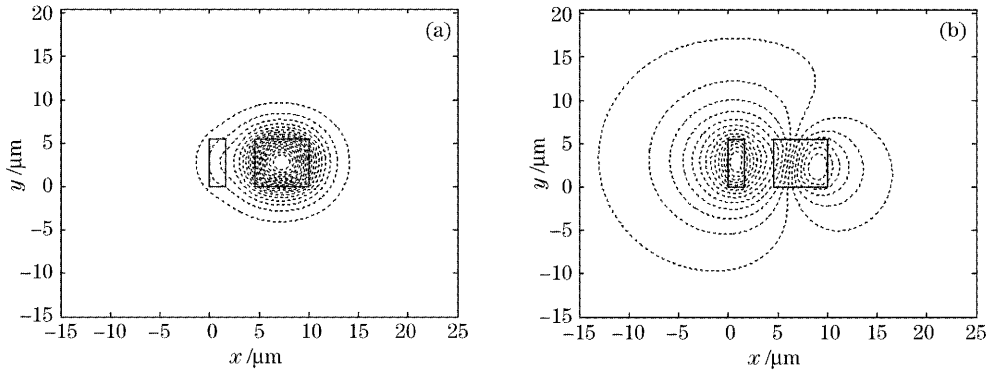


图 4 非对称耦合器的正交模式的主电场分量的分布图。(a) ψ_0 , (b) ψ_1

Fig. 4 Major electric field components of the normal modes of the asymmetric coupler. (a) ψ_0 , (b) ψ_1

将它们代入(6)式, 并令 $\Delta n_{UV} = 0.6 \times 10^{-3}$, 工作波长为 $\lambda_c = 1550 \text{ nm}$, 斜光栅周期为 $\Lambda = 2\pi / [\beta_0(\lambda_0) + \beta_1(\lambda_0)] \approx 535.6 \text{ nm}$, 可得各耦合系

数。对于粗波导光栅型、细波导光栅型与双波导光栅型光分插复用器器件, 其耦合系数随斜光栅的倾斜角的变化如图 5。

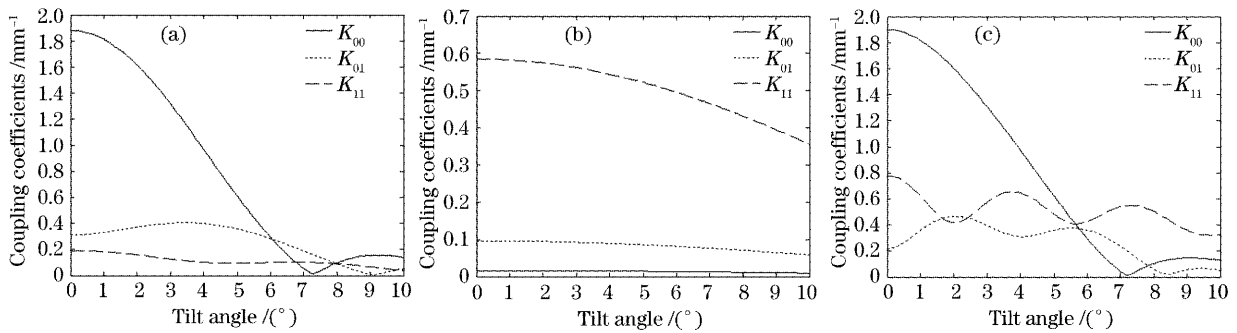


图 5 耦合系数随斜光栅的倾斜角度的变化曲线。(a) 粗波导光栅型, (b) 细波导光栅型, (c) 双波导光栅型

Fig. 5 Coupling coefficients dependent on tilt angle of the slanted grating. (a) Grating-on-wide-wave guide, (b) grating-on-thin-wave guide, (c) grating-on-dual-wave guide

在相同的条件下, 三种类型光分插复用器器件的自耦合系数与互耦合系数的关系可总结如下:

类型	细波导光栅型	粗波导光栅型	双波导光栅型
互耦合系数	较小	较大	较大
自耦合系数	较大	较小	较大

这是因为波分复用信号由细波导输入时, 在耦合部分激发的是 TE_1 , 它的主电场分布 ψ_1 主要集中在细波导上, 根据自耦合系数公式(4b), 自耦合系数 K_{11} 主要由细波导区域贡献, 所以细波导光栅型和双波导光栅型的 K_{11} 会较大, 粗波导光栅型的 K_{11}

会较小, 即粗波导光栅型光分插复用器器件的回波可低于其他类型。而 TE_0 的主电场分布 ψ_0 绝大部分集中在粗波导上, 根据互耦合系数公式(4a), 互耦合系数 K_{01} 主要由粗波导区域贡献, 所以细波导光栅型 K_{01} 会较小, 而粗波导光栅型和双波导光栅型的 K_{01} 会较大, 即粗波导光栅型与双波导光栅型光分插复用器器件的串扰可低于其它类型。所以, 当波分复用信号由细波导输入时, 粗波导光栅型器件有较小的自耦合系数与较大的互耦合系数, 是较理想的选择。同理, 若波分复用信号由粗波导输入, 在

耦合部分激发的是 TE_0 。由于 ψ_0 绝大部分集中在粗波导上,若要使自耦合系数较小,则器件结构必须是细波导光栅型的,但同时它的互耦合系数也较小,即相同情况下光分插复用器器件的串扰较大。综上所述,我们选择粗波导光栅型的器件,并以细波导为输入端。以下的分析就只是针对粗波导光栅型的光分插复用器。

由图 5(a)可知,在以上参量下,当 $\theta=3.5^\circ$ 时,粗波导光栅型器件有较大的互耦合系数与较小的自耦合系数,所以斜光栅的优化角度为 $\theta=3.5^\circ$ 。而且耦合系数变化非常平缓,这意味着斜光栅的倾斜角度的容差很大。

当倾斜角度为 $\theta=0^\circ$ 时,斜光栅辅助的光分插复用器器件变成了垂直光栅辅助的光分插复用器器件,但由图 5(a)可知,与 $\theta=3.5^\circ$ 时相比,光栅的自耦合系数较大,互耦合系数较小,耦合特性不如斜光栅辅助的器件结构,所以垂直光栅辅助的光分插复用器器件的串扰和回波不如斜光栅辅助的光分插复用器器件。

4 光分插复用器的性能

在器件的平行部分,总电场可表示为

$$E = \{ [A_0(z) \exp(-j\beta_0 z) + B_0(z) \exp(j\beta_0 z)] \psi_0(x, y) + [A_1(z) \exp(-j\beta_1 z) + B_1(z) \exp(j\beta_1 z)] \psi_1(x, y) \} \exp(j\omega t), \quad (7)$$

其中 $A_0(z)$ 与 $B_0(z)$ 分别是正向、反向传播的 TE_0 的振幅, $A_1(z)$ 与 $B_1(z)$ 分别是正向、反向传播的 TE_1 的振幅,它们的耦合方程为

$$\begin{cases} \frac{dA_0}{dz} = -jK_{00}B_0(z) \exp(j2\Delta\beta_0 z) - jK_{01}B_1(z) \exp[j(\Delta\beta_0 + \Delta\beta_1)z], \\ \frac{dA_1}{dz} = -jK_{01}B_0(z) \exp[j(\Delta\beta_0 + \Delta\beta_1)z] - jK_{11}B_1(z) \exp(j2\Delta\beta_1 z), \\ \frac{dB_0}{dz} = jK_{00}^*A_0(z) \exp(-j2\Delta\beta_0 z) + jK_{01}^*A_1(z) \exp[-j(\Delta\beta_0 + \Delta\beta_1)z], \\ \frac{dB_1}{dz} = jK_{01}^*A_0(z) \exp[-j(\Delta\beta_0 + \Delta\beta_1)z] + jK_{11}^*A_1(z) \exp(-j2\Delta\beta_1 z), \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\Delta\beta_i = \beta_i - \pi/\Lambda (i = 0, 1)$ 。

若 $n_t = 1.455, n_c = 1.444, h = 5.5 \mu\text{m}, w_1 = 1.6 \mu\text{m}, w_2 = 5.4 \mu\text{m}, g_0 = 3 \mu\text{m}, g(0) = 35 \mu\text{m}, L_1 = 3000 \mu\text{m}, g(z) = g_0 + [g(0) - g_0][1 + \cos(\pi z/L_1)]/2$ 。切趾型光栅的 $\Delta n_{UV} = 0.6 \times 10^{-3}, \theta = 3.5^\circ, \Lambda \approx 535.6 \text{ nm}, L_2 = 8 \text{ mm}$ 。此时基于斜光

栅辅助的粗波导光栅型光分插复用器器件的性能如图 6 所示。图 6(a)表示光从 Input 端口输入时器件的性能,图 6(b)表示光从 Add 端口输入时器件的性能。前者的串扰为 -30 dB ,由于回波峰值波长为 $\lambda_1 = 1547.6 \text{ nm}$,附近的波分复用信道为 1546.8 nm 与 1548.4 nm ,所以器件的回波为 -25 dB ,它出现

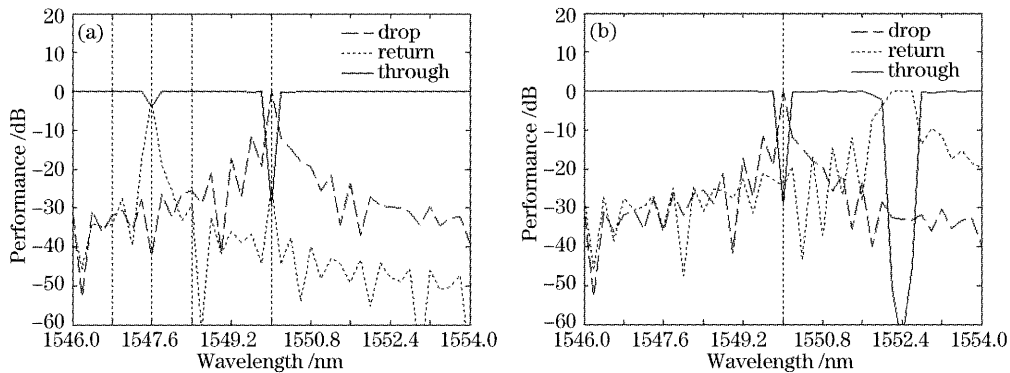


图 6 粗波导斜光栅型光分插复用器器件的性能光谱图。(a) 波分复用信号从输入端口输入,(b) 波分复用信号从上载端口输入
Fig. 6 Spectral response of the tilt-grating-on-wide-waveguide OADM when (a) light is launched into input port, (b) light is launched into add port

在 $\lambda_c = 1550 \text{ nm}$ 处; 后者的串扰为 -30 dB , 由于上载的波分复用信号只是在 $\lambda_c = 1550 \text{ nm}$ 处, 所以上载时器件的回波也是 -25 dB 。

同时模拟的还有垂直光栅辅助的非对称耦合器型光分插复用器器件的性能。假设光栅倾斜角度为 $\theta = 0^\circ$, 其他条件不变, 则光从 Input 端口输入时, 器件的串扰为 -15 dB , 回波为 -20 dB ; 光从 Add 端口输入时, 器件的串扰为 -15 dB , 回波为 -20 dB 。可知垂直光栅辅助的非对称耦合器型光分插复用器器件的性能不如斜光栅辅助的器件。

5 光分插复用器的误差分析

对于斜光栅辅助的非对称耦合器型光分插复用器, 由于集成光学成熟的工艺, 而且本器件中非对称耦合器制作工艺简单, 串扰特性又非常稳定, 所以耦合器的工艺容差比较容易满足; 本器件对光栅与波导的相对位置没有特殊要求, 但波导光栅目前主要由紫外写入的方式制作, 光栅与波导的夹角控制须靠人工对准, 所以斜光栅的角度容差必须较大。以下的误差分析主要集中在斜光栅角度的误差分析上。

如图 5(b) 所示, 自耦合系数与互耦合系数随斜光栅角度 θ 的变化而变化, 这会影响器件的串扰与回损。但由于本设计中耦合系数的变化缓慢, 且回波峰值波长放在了波分复用信道之外, 所以斜光栅的角度容差较大。斜光栅辅助的非对称耦合器型光分插复用器器件的性能随斜光栅角度的变化如图 7 所示。波分复用信号从 Input 端口与 Add 端口输入时, 器件的串扰与回损一致。当斜光栅的角度在 2.5° 到 4.5° 的变化范围内, 器件的串扰低于 -28 dB , 回损低于 -22 dB 。

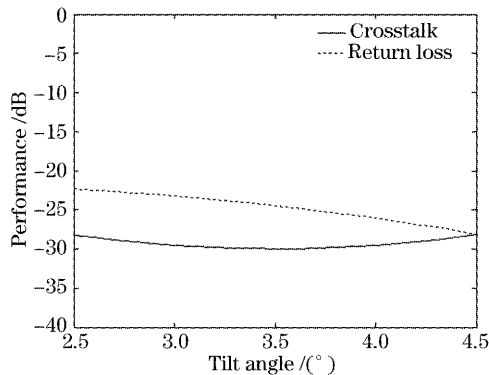


图 7 粗波导光栅型光分插复用器器件的性能随斜光栅的倾斜角的变化曲线

Fig. 7 Dependence of performance of the OADM on tilt angle of the slanted grating

6 结 论

提出并分析了一种基于斜光栅辅助的非对称耦合器型光分插复用器。利用 BPM3D 模拟得非对称耦合器的串扰低于 -35 dB 。利用复合波导的三维正交模式对双波导光栅型、细波导光栅型与粗波导光栅型光分插复用器器件进行了理论分析, 选出粗波导光栅型器件。通过耦合模理论, 模拟了斜光栅的耦合特性, 优化了器件的参量。通过回波峰值波长设计法, 改善了器件的性能与工艺容差。模拟结果显示斜光栅辅助的非对称耦合器型光分插复用器器件的串扰为 -30 dB , 回损为 -25 dB 。考虑到实际制作的需要, 着重分析了斜光栅倾斜角度的误差对器件性能的影响。当倾斜角度在 2.5° 到 4.5° 的变化范围内, 光分插复用器器件的串扰低于 -28 dB , 回损低于 -22 dB 。

参 考 文 献

- David Mechin, Philippe Grosso, Dominique Bosc. Add-drop multiplexer with UV-written Bragg gratings and directional coupler in SiO_2 -Si integrated waveguides [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(9): 1282~1286
- Turan Erdogan, Thomas A. Strasser, Michele A. Mibrodt *et al.*. Integrated-optical Mach-Zehnder add-drop filter fabricated by a single UV-induced grating exposure [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(30): 7838~7845
- Torsten Augustsson. Bragg grating-assisted MMI-coupler for add-drop multiplexer [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **16**(8): 1517~1522
- Christos Riziotis, Mikhail N. Zervas. Design considerations in optical add/drop multiplexers based on grating-assisted null coupler [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(1): 92~104
- Guido Perrone, Marco Laurenzano, Ivo Montrosset. Design and feasibility analysis of an innovative integrated grating-assisted add-drop multiplexer [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(12): 1943~1948
- Ming Li, Yaming Wu. Design of an integrated optical add-drop multiplexer with low cross-talk and low back-reflection [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **242**: 371~381
- Turan Erdogan. Optical add-drop multiplexer based on an asymmetric Bragg coupler [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **157**: 249~264
- Ming Li, Yaming Wu, Jianyi Yang *et al.*. Return loss reduction of integrated grating-assisted optical add/drop multiplexer by control of the reflective spectrum [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1403~1409
- Li Ming, Wu Yaming. Theoretical analysis of asymmetric Y-waveguide structure [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(8): 900~905 (in Chinese)
- 李明, 吴亚明. 非对称 Y 分支波导结构的理论分析 [J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(8): 900~905
- BPM-CAD. Optiwave Corporation, Canada. Available: <http://www.optiwave.com>
- G. Ronald Hadley, R. E. Smith. Full-vector waveguide modeling using an iterative finite-difference method with transparent boundary conditions [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(3): 465~469