

应用光纤光栅的马赫-陈德尔型波分复用器特性的理论分析

刘永红¹ 刘水华² 虞国华¹ 江 山² 方罗珍² 黄德修¹

1, 华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074

2, 邮电部武汉邮电科学院固体器件所, 武汉 430074

摘 要 利用光振幅传输矩阵对光纤光栅马赫-陈德尔型波分复用器的特性进行了理论研究, 分析了结构参数对器件性能的影响, 给出了其最佳的结构参数。

关键词 马赫-陈德尔型波分复用器, 光纤光栅, 波分复用器件特性。

1 引 言

密集型波分复用(DWDM)是实现超高速、大容量现代通信的关键技术之一, 一般的波分复用器件很难满足密集型波分复用通道间隔(约 1 nm)的要求, 光纤光栅的出现为实现密集型波分复用提供了一种新的方法。利用光纤光栅可制作多种结构的波分复用器^[1-3], 其中马赫-陈德尔型波分复用器是一种典型的结构。该结构具有高的分离/耦合效率、低的附加损耗、及相对高的通道隔离度等优点。本文将对该结构的波分复用器件的特性进行了分析研究。

2 理论分析

光纤光栅马赫-陈德尔干涉型波分复用器的结构如图 1 所示, 它包括两个连续控制的 3 dB 耦合器, 及两个对称分布于两臂的参数相同的光纤光栅。 $E_1(\lambda_i)$ 为从端口 1 输入的一束光 ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$) 的光场, $E'_1(\lambda_i), E'_2(\lambda_i), E_3(\lambda_i), E_4(\lambda_i)$ 分别为从端口 1~4 输出的光场。该

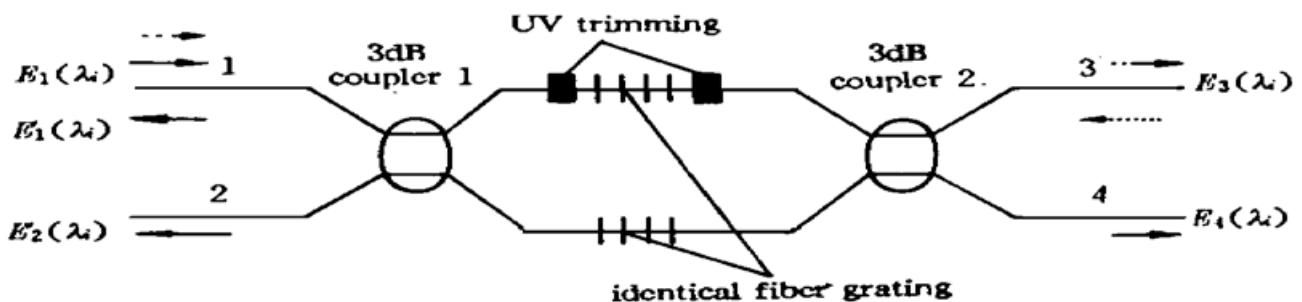


Fig. 1 Schematic of WDM device showing extractio (-)/inset(\dots) of wavelength channel λ_2 from a transmission stream

结构具有插入及分离波长的作用。

分离波长时,一束光波(λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 \dots 、 λ_n)输入到端口1,然后由3dB耦合器耦合到马赫-陈德尔干涉仪的两臂。两臂上的光纤光栅具有反射滤波器的作用,其反射谱形状如图2所示。

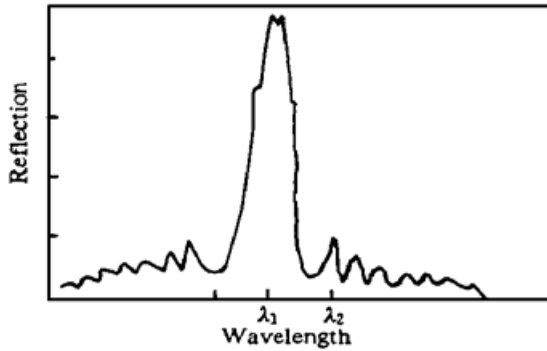


Fig. 2 Reflection spectrum of in-core fiber Bragg grating

假设光栅的中心反射波长为 λ_2 ,且两臂相位匹配,则波长为 λ_2 的光由光栅反射,经耦合器1耦合到端口2,透过光栅的光通过耦合器2耦合到端口4。这样波长为 λ_2 的光便与其他光波分开。同样道理,插入波长时,如图1中虚线所示,波长为 λ_2 的光从端口3输入,从端口4输出,实现合波。

下面将利用光振幅传输矩阵研究该结构波分复用器的工作原理及特性,并分析其结构参数对性能的影响。本文仅对其分波特性和合波特性的方法分析。

设耦合器耦合系数(耦合到其中一路的光功率与输入光功率之比)为 α , $\Phi_1(\lambda_i)$ 、 $\Phi_2(\lambda_i)$ 为由耦合器和光栅之间的臂长及光栅引起的光波的附加相位(与光栅的特性及臂长有关), $\Phi_3(\lambda_i)$ 、 $\Phi_4(\lambda_i)$ 为两耦合器之间的臂长和光栅引起的光的附加相位, $R_1(\lambda_i)$ 、 $R_2(\lambda_i)$ 为两光栅的反射率,忽略耦合器及光栅的损耗,并假设耦合器在波分复用器件工作波长范围内具有相同的耦合系数。则端口1与2输出的光场可表示为输入光场与两耦合器及干涉臂的光振幅转换矩阵相乘的形式:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E'_1(\lambda_i) \\ E'_2(\lambda_i) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \alpha^{1/2} & i(1-\alpha)^{1/2} \\ i(1-\alpha)^{1/2} & \alpha^{1/2} \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} R_1(\lambda_i)^{1/2} \exp[i\Phi_1(\lambda_i)] & 0 \\ 0 & R_2(\lambda_i)^{1/2} \exp[i\Phi_2(\lambda_i)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha^{1/2} & i(1-\alpha)^{1/2} \\ i(1-\alpha)^{1/2} & \alpha^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1(\lambda_i) \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} E_3(\lambda_i) \\ E_4(\lambda_i) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \alpha^{1/2} & i(1-\alpha)^{1/2} \\ i(1-\alpha)^{1/2} & \alpha^{1/2} \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} T_1(\lambda_i)^{1/2} \exp[i\Phi_3(\lambda_i)] & 0 \\ 0 & T_2(\lambda_i)^{1/2} \exp[i\Phi_4(\lambda_i)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha^{1/2} & i(1-\alpha)^{1/2} \\ i(1-\alpha)^{1/2} & \alpha^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1(\lambda_i) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $T_1(\lambda_i) = 1 - R_1(\lambda_i)$, $T_2(\lambda_i) = 1 - R_2(\lambda_i)$ 。

由(1)式可得

$$\begin{aligned} |E'_1(\lambda_i)|^2 &= \{\alpha^2 R_1(\lambda_i) + (1-\alpha)^2 R_2(\lambda_i) - \\ &2\alpha(1-\alpha) \sqrt{R_1(\lambda_i) R_2(\lambda_i) \cos[\Delta\Phi(\lambda_i)]}\} |E_1(\lambda_i)|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} |E'_2(\lambda_i)|^2 &= \alpha(1-\alpha) \{R_1(\lambda_i) + R_2(\lambda_i) + \\ &2 \sqrt{R_1(\lambda_i) R_2(\lambda_i) \cos[\Delta\Phi(\lambda_i)]}\} |E_1(\lambda_i)|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$|E_3(\lambda_i)|^2 = \{\alpha^2 T_1(\lambda_i) + (1-\alpha)^2 T_2(\lambda_i) -$$

$$2\alpha(1-\alpha)\sqrt{T_1(\lambda_i)T_2(\lambda_i)\cos[\Delta\Phi(\lambda_i)]}|E_1(\lambda_i)|^2 \quad (4)$$

$$|E_4(\lambda_i)|^2 = \alpha(1-\alpha)\{T_1(\lambda_i) + T_2(\lambda_i) + 2\sqrt{T_1(\lambda_i)T_2(\lambda_i)\cos[\Delta\Phi(\lambda_i)]}|E_1(\lambda_i)|^2\} \quad (5)$$

其中

$$\Delta\Phi(\lambda_i) = \Phi_1(\lambda_i) - \Phi_2(\lambda_i), \quad \Delta\Phi(\lambda_i) = \Phi_1(\lambda_i) - \Phi_2(\lambda_i).$$

由(2)~(5)式可以分析该结构的波分复用器的特性,讨论时假设波分复用器分离的波长为 λ_2 ,与其有关的特性参数可定义为:

$$\text{分光效率} \quad \eta_s = |E_2'(\lambda_2)|^2 / |E_1(\lambda_2)|^2 \quad (6)$$

$$\text{通道隔离度} \quad IS_{2j} = 10 \lg [|E_2'(\lambda_2)|^2 / |E_2'(\lambda_j)|^2], \quad j \neq 2 \quad (7)$$

$$\text{分离波长的回波损耗} \quad RL = 10 \lg [|E_1(\lambda_2)|^2 / |E_1'(\lambda_2)|^2] \quad (8)$$

$$\text{非分离波长附加损耗} \quad AL = 10 \lg [|E_1(\lambda_i)|^2 / |E_4(\lambda_i)|^2] \quad (9)$$

由(2)~(9)式可以分析器件的工作特性与其结构参数之间的关系。对理想的波分复用器,希望输入光中对应于光栅反射波长 λ_2 的光完全从端口2输出,而其余的光全部从端口4输出。令 $|E_1'(\lambda_i)|^2 = 0$, $|E_3(\lambda_i)|^2 = 0$,由(1)式和(3)式得

$$\left. \begin{aligned} \alpha \sqrt{R_1(\lambda_i)} &= (1-\alpha) \sqrt{R_2(\lambda_i)} \\ \alpha \sqrt{T_1(\lambda_i)} &= (1-\alpha) \sqrt{T_2(\lambda_i)} \\ \Delta\Phi(\lambda_i) &= 2k\pi, \quad \Delta\Phi(\lambda_i) = 2m\pi, \quad k, m = \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由(10)式可知当端口1和3没有输出时,应使 $R_1(\lambda_i) = R_2(\lambda_i)$, $\alpha = 1/2$, $\Delta\Phi(\lambda_i) = 2k\pi$, $\Delta\Phi(\lambda_i) = 2m\pi$ 。此时端口2和4输出的波长为 λ_2 的光强分别为:

$$\left. \begin{aligned} |E_2(\lambda_i)|^2 &= R(\lambda_i) |E_1(\lambda_i)|^2 \\ |E_4(\lambda_i)|^2 &= T(\lambda_i) |E_1(\lambda_i)|^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 $R(\lambda_i) = R_1(\lambda_i) = R_2(\lambda_i)$, $T(\lambda_i) = T_1(\lambda_i) = T_2(\lambda_i)$

由(11)可以看出要使波长为 λ_2 的光完全从端口2输出,其余波长完全从端口4输出,除满足(10)式外,还应使 $R(\lambda_i) = 100\%$, $T(\lambda_i) = 100\%$, $i \neq 2$,此时的波分复用器的性能是最理想的,能够实现对 λ_2 波长光的完全分离,没有插入和回波损耗,具有无穷大的隔离度。

下面将具体分析器件的特性与其结构参数之间的关系。

2.1 器件的分光效率

分光效率可表示为:

$$\eta_s = |E_2'(\lambda_2)|^2 / |E_1(\lambda_2)|^2 = \alpha(1-\alpha)\{R_1(\lambda_2) + R_2(\lambda_2) + 2\sqrt{R_1(\lambda_2)R_2(\lambda_2)\cos[\Delta\Phi(\lambda_2)]}\} \quad (12)$$

耦合器的耦合系数 α 、光栅反射率 $R_1(\lambda_2)$ 、 $R_2(\lambda_2)$ 、两臂的相位差对分光效率都有影响。图3是当 $R_1(\lambda_2) = R_2(\lambda_2) = 99.4\%$ 时,分光效率与耦合器的分光比 α 及两臂相位差 $\Delta\Phi(\lambda_2)$ 的关系图。

当 $\alpha = 1/2$ 、 $\Delta\Phi(\lambda_2) = 2k\pi$ 时,波分复用器具有最好的分光特性,分光效率可达99.4%,当偏离该条件时从端口2输出的波长为 λ_2 的光减少,若 $R_1(\lambda_2)$ 、 $R_2(\lambda_2)$ 不为1,则端口1、端

口 3、端口 4 均有 λ_2 光输出。

光栅反射率对器件的分光效率也有较大的影响，提高光栅的反射率可提高分光效率，当 $\alpha = 1/2$ 、 $\Delta\phi(\lambda_2) = 2k\pi$ 时分光效率与光栅反射率的关系为

$$\eta_s = [R_1(\lambda_2) + R_2(\lambda_2) + 2 \sqrt{R_1(\lambda_2)R_2(\lambda_2)}] / 4$$

图 4 为分光效率与光栅反射率的关系示意图。

可见波分复用器的分光效率随光栅反射率的增加而增加，当 $R_1(\lambda_2)$ 、 $R_2(\lambda_2)$ 都为 1 的理想情况下分光效率为 100%。

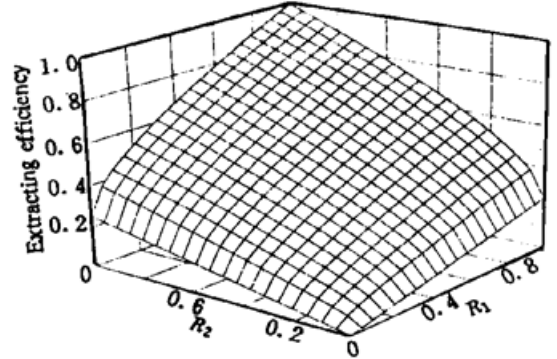
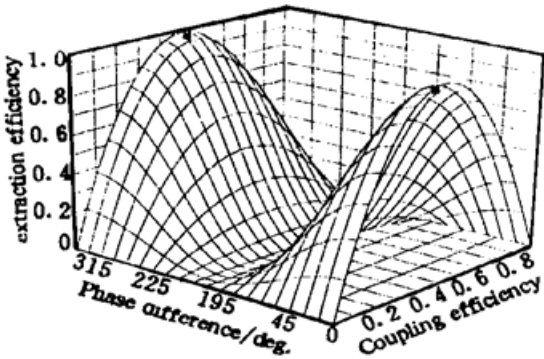


Fig. 3 Relationship between extraction efficiency and coupling coefficient α and phase difference $\Delta\phi(\lambda_2)$

Fig. 4 Relationship between extraction efficiency and the reflection of fiber grating

2.2 器件的隔离度

由隔离度的定义

$$IS_{2j} = 10 \lg [|E'_2(\lambda_2)|^2 / |E'_2(\lambda_j)|^2] = \{ R_1(\lambda_2) + R_2(\lambda_2) + 2 \sqrt{R_1(\lambda_2)R_2(\lambda_2) \cos [\Delta\phi(\lambda_2)]} \} \times \{ R_1(\lambda_j) + R_2(\lambda_j) + 2 \sqrt{R_1(\lambda_j)R_2(\lambda_j) \cos [\Delta\phi(\lambda_j)]} \}^{-1} \quad (13)$$

可以看出耦合器的耦合比对隔离度没有影响。由于光纤光栅的带宽很窄，若 λ_j 不在其反射谱范围内，即 $R_1(\lambda_j) = R_2(\lambda_j) = 0$ 时，器件的隔离度为无穷大，若 λ_j 在光栅的反射谱之中，由于

λ_j 与 λ_2 相距很近，可以认为 $\Delta\phi(\lambda_j) = \Delta\phi(\lambda_2)$ ，此时器件的隔离度主要由光栅的边模抑制比决定，假设 $R(\lambda_i) = R_1(\lambda_i) = R_2(\lambda_i)$ ，则

$$IS_{2j} = 10 \lg [R(\lambda_2)/R(\lambda_j)], \quad j \neq 2 \quad (14)$$

波分复用器的隔离度与光栅的边模抑制比成正比，如图 5 所示。

可见若希望器件具有较高的隔离度应使光栅具有高的边模抑制比，如果所用光栅对 100 GHz 外的波长的边模抑制比为 24 dB，则器件对该波长通道的隔离度最大可达 24 dB。

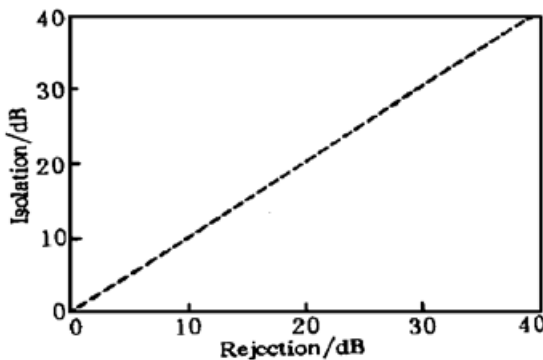


Fig. 5 Relationship between isolation and sidemode rejection of fiber grating

2.3 器件的回波损耗

根据回波损耗的定义，

$$RL = 10 \lg [|E_1(\lambda_2)|^2 / |E'_1(\lambda_2)|^2] = - 10 \lg \{ \alpha^2 R_1(\lambda_2) + (1 - \alpha)^2 R_2(\lambda_2) -$$

$$2\alpha(1 - \alpha) \sqrt{R_1(\lambda_2) R_2(\lambda_2) \cos [\Delta\phi(\lambda_2)]} \quad (15)$$

影响回波损耗的主要因素是耦合系数及两光栅的一致性和两臂的相位匹配。图6是当 $R_1(\lambda_2) = R_2(\lambda_2) = 99.4\%$ 时回波损耗与耦合器的耦合系数 α 及两臂相位差 $\Delta\phi(\lambda_2)$ 的关系图。由图可见，当 $\alpha = 1/2$ 、 $\Delta\phi(\lambda_2) = 2k\pi$ 时，器件具有无穷大的回波损耗。

当 $\Delta\phi(\lambda_2) = 2^\circ$ 时，回波损耗与 $\alpha \sqrt{R_1(\lambda_2)}$ 、 $(1 - \alpha) \sqrt{R_2(\lambda_2)}$ 的关系如图 7 所示。图中 mult1 为 $\alpha \sqrt{R_1(\lambda_2)}$ ，mult2 为 $(1 - \alpha) \sqrt{R_2(\lambda_2)}$ 。

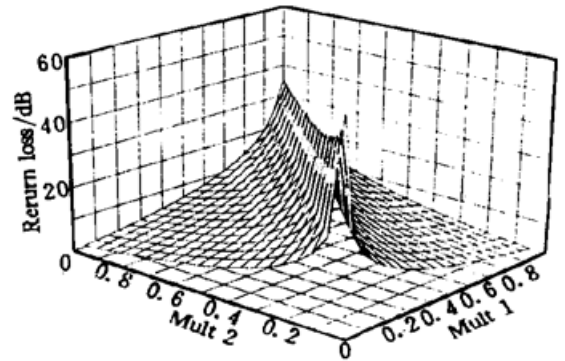
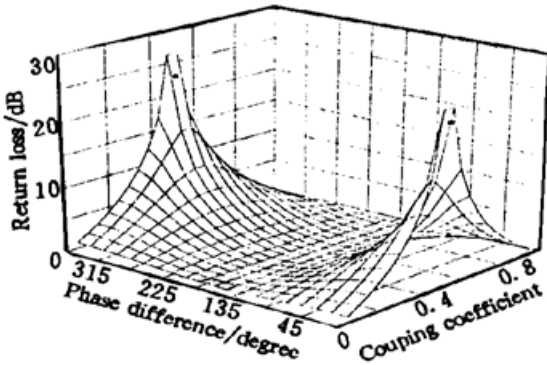


Fig. 6 Relationship between return loss and coupling coefficient α and phase difference $\Delta\phi(\lambda_2)$ Fig. 7 Relationship between return loss and $\alpha \sqrt{R_1(\lambda_2)}$ 、 $(1 - \alpha) \sqrt{R_2(\lambda_2)}$

当 $\alpha \sqrt{R_1(\lambda_2)} = (1 - \alpha) \sqrt{R_2(\lambda_2)}$ 时有最大的回波损耗值，且回波损耗随着 $\alpha \sqrt{R_1(\lambda_2)}$ 、 $(1 - \alpha) \sqrt{R_2(\lambda_2)}$ 的减小而增加，由于获得大的分光比要求有大的 $R_1(\lambda_2)$ 、 $R_2(\lambda_2)$ ，且 $\alpha = 1/2$ 时分光效率最大，因此一般 $\alpha \sqrt{R_1(\lambda_2)}$ 、 $(1 - \alpha) \sqrt{R_2(\lambda_2)}$ 的数值为 0.5 左右，此时，在两臂存在较大相位差的情况下，回波损耗仍可达 35 dB 以上，可见要得到高的回波损耗值需使

$$R_1(\lambda_2) = R_2(\lambda_2), \quad \alpha = 1/2, \quad \Delta\phi(\lambda_2) = 2k\pi.$$

2.4 附加损耗

波长为 λ_2 的光从端口 2 输出，其余的光绝大部分进入端口 4，但由于结构的不完善，将会使小部分的光从其他端口输出，因此产生附加损耗。附加损耗的表达式为：

$$AL = 10 \lg \left[\frac{|E_1(\lambda_i)|^2}{|E_4(\lambda_i)|^2} = -10 \lg \left(\alpha(1 - \alpha) \{ T_1(\lambda_i) + T_2(\lambda_i) + 2 \sqrt{T_1(\lambda_i) T_2(\lambda_i) \cos [\Delta\phi(\lambda_i)]} \} \right) \right]$$

附加损耗受耦合器的耦合系数、光栅对 λ_i 波长的透过率、及干涉仪两臂相位匹配性的影响，当 $R_1(\lambda_2) = R_2(\lambda_2) = 99.4\%$ ，光栅对 100 GHz 外的波长的边模抑制比为 24 dB 时，100 GHz 处的光栅的透过率为 99.61%，此时附加损耗与耦合器的分光比及干涉仪两臂引入的位相差的关系如图 8 所示，由图可见， $\alpha = 1/2$ 、 $\Delta\phi(\lambda_i) = 2k\pi$ 时，附加损耗最小为 0.02 dB。减少与 λ_2 相邻通道的光附加损耗，除要求耦合系数为 1/2 及两臂的相位匹配外，还要求光栅具有高的边模抑制比。对距 λ_2 较远的通道波长，光栅的透过率为 100%，器件对该波长的附加损耗只与 α 及 $\Delta\phi(\lambda_i)$ 有关，当 $\alpha = 1/2$ 、 $\Delta\phi(\lambda_i) = 2k\pi$ 时，附加损耗为 0 dB。

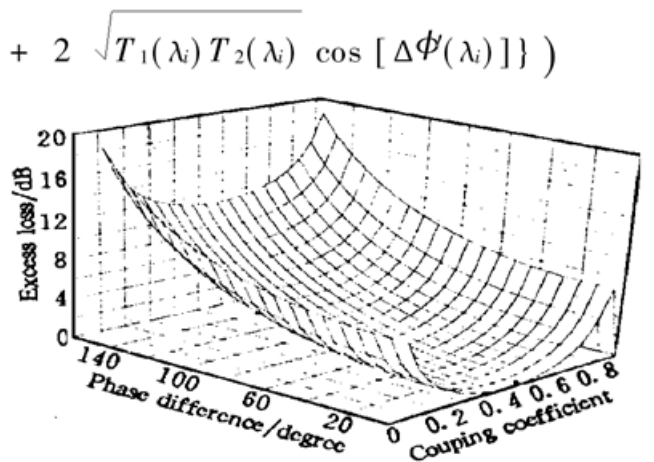


Fig. 8 Relationship between excess loss and coupling coefficient α and phase difference $\Delta\phi(\lambda_i)$

为了使波分复用器件在所有的工作波长都具有较小的附加损耗,耦合器必须在较宽的带宽内具有稳定的耦合系数。

以上讨论了器件作为分波器时的特性,由于该结构的对称性,对于其合波特性和可用类似的方法分析。当耦合器的耦合系数为 $1/2$,两光栅高度一致且具有高的边模抑制特性,干涉仪两臂平衡时,该波分复用器具有最佳的合波特性和。

如果光栅具有高的反射率,则该器件可以同时实现分离 λ_2 波长和插入 λ_2 光波的作用,另外若插入的波长(λ_m)在波分复用器件工作波长以外,可以在两臂上制作另外两个相同的反射波长为 λ_m 光栅,这样器件可同时实现插入及分离波长的作用。可见光纤光栅马赫-陈德尔型波分复用器可用作光通信中的上/下话路系统。

3 总结与讨论

由以上分析,可以得到以下结论:

1) 要提高器件的分光效率,要求光栅有高的反射率,耦合器的耦合系数为 $1/2$,两臂相位匹配。最佳条件下分光效率与光栅反射率相等,但由于耦合器和光栅的损耗,会使分光效率降低约 0.2 dB;

2) 要提高器件的隔离度,光纤光栅要有高的边模抑制比,关键是光纤光栅具有窄的带宽及好的边模特性,实际制作中,器件的隔离度可达 40 dB 以上;

3) 要提高回波损耗,需使耦合器的耦合系数为 $1/2$,光栅具有相同的反射率,且两臂相位匹配。理想情况下,回波损耗值可达无穷大;

4) 降低附加损耗,要求光栅有高的边模抑制比,两臂相位匹配,另外还要使耦合器在较宽的范围内有稳定的耦合系数 $1/2$ 。考虑到耦合器和光栅的损耗,实际上器件的附加损耗可达 0.5 dB 以下。

用本文公式计算出的结果与文献[3]中的实验结果有较好的吻合。文献[3]中所用光栅的反射率为 99.4% ,光栅中心反射波长对 100 GHz 以外波长的反射率的抑制比为 24 dB,制作的波分复用器的分光效率为 99.4% ,通道隔离度大于 20 dB,回波损耗约为 23 dB,附加损耗约 0.5 dB,如图中黑点所示。理论与实验有一定偏差的原因是由于在实际制作波分复用器件时,其结构参数并不是理想的,且耦合器和光栅一般共有约 0.4 dB 的损耗。

实际制作中一般可以用紫外光照射干涉仪的一臂来调整两臂相位差来实现相位匹配,如图1中的UV补偿就是这个作用。为使光栅具有一致性应预先用两根光纤连续拉制两个耦合器,然后同时在两臂上制作光栅。另外可以对光栅进行紫外照射来调整光栅的反射率。要制作具有好的光谱特性的光栅,需寻找一种可靠的制作方法,另外还要有高光敏性的光纤,作者正进行这方面的探索工作。

结束语 通过对马赫-陈德尔型光纤光栅波分复用器特性的理论分析,得到了光纤光栅马赫-陈德尔型波分复用器件的特性与其结构参数之间的关系,并给出了器件结构参数。据此可以明确在该器件制作中应解决的关键技术。另外,对具有确定结构参数的器件,可以用本文有关公式对其性能进行正确估计。

参 考 文 献

- [1] J. L. Archambault, P. St. J. Russell, S. Barcelos *et al.*, Grating-frustrated coupler: a novel channel-ropping filter in single-mode optical fiber. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3) ·180~ 182
- [2] V. Mizrahi, T. Erdogan, D. J. Digiovanni *et al.*, Four channel fiber grating demultiplexer. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(10) ·780~ 781
- [3] F. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault *et al.*, An all-fiber dense-wavelength-division multiplexer/demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1995, **7**(4) ·388~ 390

Theoretical Analysis of the Characterization of Mach-Zehnder Wavelength Division Multiplexer using Fiber Grating

Liu Yonghong¹ Liu Shuihua² Yu Guohua¹ Jiang Shan²
Fang Luozhen² Huang Dexiu¹

1, *Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*

2, *Solid State Devices, Wuhan Research Institute of Post and Telecommunications, Wuhan 430074*

(Received 12 April 1996; revised 12 July 1997)

Abstract Transfer matrix method is used to study the characterization of Mach-Zehnder (M-Z) wave division multiplexer (WDM) using fiber Bragg grating. The influence of relative structure parameter on device characterization is analyzed, and optimum structure parameter is obtained.

Key words M-Z WDM, fiber grating, WDM device characterization.