

二元微透镜阵列在密集多载波 波分复用器中的应用*

吴小萍¹ 范朝阳² 汤伟中¹ 周文¹

(1, 浙江大学信息与电子工程学系; 2, 浙江大学物理系, 杭州 310027)

摘 要 介绍了采用位相平衡设计法设计优化的二元微透镜阵列, 并应用于工作波长为 1.536~1.564 μm , 通信间隔 4 nm 的 8 通道光栅型密集波分复用器。设计并计算了二元微透镜各单元的位相结构和接收光纤端面上的衍射远场分布, 最后讨论了当采用单模和多模接收光纤时, 二元微透镜阵列部分引入的损耗及其在多模接收光纤中激起的基模比例。

关键词 波分复用器, 耦合效率, 二元透镜。

1 引 言

光波分复用器是实现光波波分复用传输的关键器件, 近年来, 各种类型的波分复用器发展很快。目前研究最热门的是采用紫外光直接写入式光纤布拉格栅结构, 另外, 还有光纤法布里-珀罗谐振型(FFP)和声光调谐型等波分复用器件。法布里-珀罗型波分复用器件由两段尾纤和一个或两个体谐振腔组成, 谐振腔通过外置反射镜或光纤端面蒸镀介质反射膜形成, 腔长通过机械、温度或电控的液晶等来调节; 声光调谐型波分复用器件主要是利用光耦合作用来对波长进行滤波的。无源型波分复用器件虽然不能利用反馈技术进行自动信道跟踪和锁定, 对光源波长稳定性的要求较高, 但是器件本身结构较简单, 使用方便。无源型波分复用器件可分为下述三种类型: 1) 干涉滤光片型; 2) 角色散型(包括光栅型和棱镜型); 3) 熔融光纤型。

密集多载波波分复用技术是将单模光纤低损耗传输窗口波长分割成间隔为几纳米的若干个传输信道, 采用可调谐窄线宽光源将每个信道的光载波波长调定在对应的低损耗传输通道波长上, 通过波分复用器件实现多个载波信号同时在一根光纤中的传输, 从而大大提高光缆线路的传输容量。图

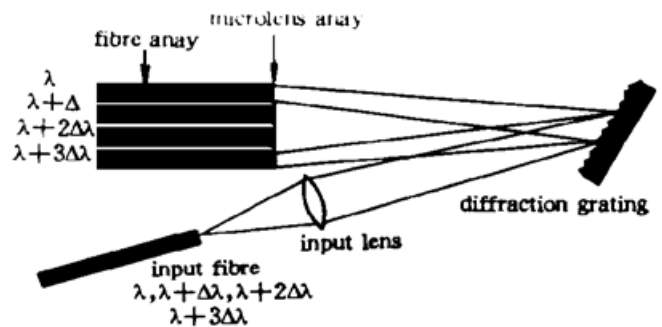


Fig. 1 Schematic outline of high density grating multiplexer

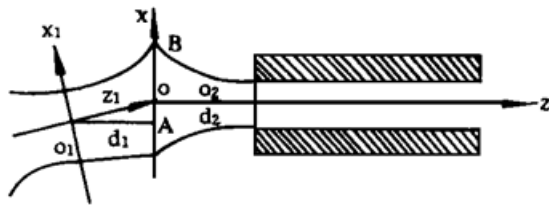
* 浙江省自然科学基金资助项目。

1 所示是工作于 $1.536 \sim 1.564 \mu\text{m}$ 波长的无源光栅型密集波分复用器的结构示意图^[1-3]，新型光栅型波分复用器与传统光栅 Littrow 型波分复用器的区别在于输入输出采用不同的透镜，且输入透镜采取在每根光纤末端各放置一个微透镜的结构，即用输入微透镜阵列来代替多根光纤共用一个输入透镜的结构。此微透镜阵列的作用是对输入光纤末端出射的很细的高斯光束进行扩束，因此光纤/微透镜阵列的组合等效于一个更大芯径的光纤阵列，增大了光纤的数值孔径，此时，相对带宽得到很大提高，降低了对激光器频率稳定的要求，降低了波长选择和控制的精确度，提供了更大的通道安装强度。

插入损耗和串话是设计波分复用的关键，此密集波分复用器的插入损耗实验值是 6.7 dB，数值偏大，其中有一部分是由于使用一般的微透镜阵列引起的。本文就是采用新型的二元微透镜阵列来代替传统的微透镜阵列。较之传统器件，它能把入射光在光纤端面上的远场与光纤基模更好地耦合匹配，从而降低微透镜阵列部分引入的损耗和串话。本文计算了二维二元微透镜阵列各单元的位相结构和接收光纤端面上的衍射远场分布，讨论了当采用单模和多模接收光纤时，二元微透镜阵列部分引入的损耗及其在多模接收光纤中激起的基模比例。

2 设计与分析

图 1 所示的合波信号经光栅分光后入射微透镜阵列，光栅参数如下：闪耀波长 $\lambda_b = 1.55$



μm ，线密度 = 600 l/mm，光栅常数 $d = 1.7 \mu\text{m}$ ，闪耀角 $\theta_b = 26.74^\circ$ 。以第四第五列阵单元的中心为坐标 Z 轴，其模型如图 2 所示。在微透镜阵列小距离范围内 ($O_1O \ll$ 光栅到微透镜单元的距离)，入射激光是准平行的。二元微透镜单元把以 θ 角倾斜入射，腰斑为 ω_{b1} 的高斯光束转化为能与接收光纤最佳耦合，腰斑为 ω_{b2} 的高斯光束垂直入射接收光纤， ω_{b2} 是接收光纤基模采用高斯近似应取的束斑。

Fig. 2 Idealization of laser to fiber coupling using binary microlenses

斯近似应取的束斑。

采用位相平衡法来设计二元微透镜阵列^[4]，对 (x, y, z) 座标进行旋转变换， B 点的座标由 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta, z = 0$ 变换为

$$x_1 = (y + d_1 \tan \theta) \cos \theta - (z + d_1) \sin \theta \quad (1)$$

$$y_1 = (y + d_1 \tan \theta) \sin \theta + (z + d_1) \cos \theta \quad (2)$$

$$z_1 = z \quad (3)$$

式中 OB 为 r ， O_1O 为 z_1 ， O_1O 在 z 方向的投影 O_1A 为 d_1 。设光在 O_1 点的振幅为 A ，在 (x_1, y_1, z_1) 新座标中，入射高斯光束在二元微透镜阵列左边所具有的相位是

$$P_1(r) = \frac{k(x^2 + y^2)}{2R_1(z_1)} \quad (4)$$

而在二元微透镜阵列右边所具有的相位是

$$P_2(r) = - \frac{k(x^2 + y^2)}{2R_2(d_2)} \quad (5)$$

其中 d_2 为直线 OO_2 段的长。由此二元微透镜上任一点的相位

$$P_L = P_2(r) - P_1(r) \quad (6)$$

这样，就给出了二元微透镜单元上任一点的位相值。图 3(a) 和图 3(b) 所示即为传输波长为

1.548 μm 的信号, 以倾斜角 0.08° 入射第四个微透镜单元, 被多模和单模接收光纤接收时第四个微透镜单元表面的位相分布。

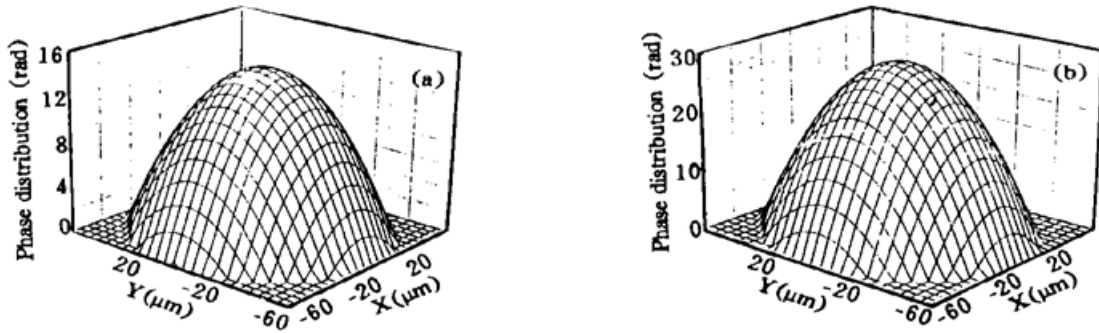


Fig. 3 The designed phase distribution for binary microlenses ($\lambda = 1.548 \mu\text{m}$, $D = 120 \mu\text{m}$)

(a) for multi-mode receiving fiber, (b) for single-mode receiving fiber

高斯光束以 θ 角斜入射, 在 B 点振幅为 A_B , 相位为 P_B , 象点 I 处的复振幅为各积分块强度贡献的矢量和, 根据菲涅尔衍射公式

$$U(I) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} A_B \exp(iP) \frac{\exp(jkr_2)}{r_2} \frac{1 + \cos(n, r_2)}{2} ds \quad (7)$$

图 4(a) 和图 4(b) 所示即为传输波长为 $1.548 \mu\text{m}$ 的信号, 高斯光以 0.08° 入射第四个微透镜单元, 被多模和单模接收光纤接收的衍射远场分布。

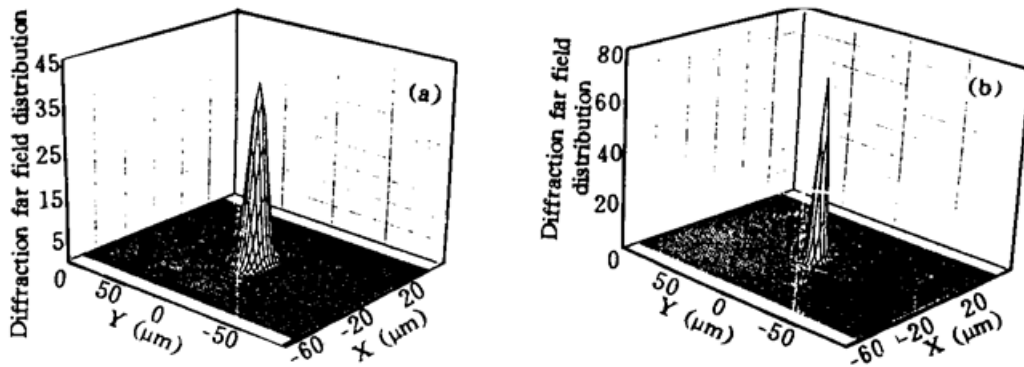


Fig. 4 The diffraction far field distribution for the fourth channel ($\lambda = 1.548 \mu\text{m}$, $\theta = 0.08^\circ$)

(a) for multi-mode receiving fiber, (b) for single-mode receiving fiber

把图 4(a) 所示入纤端面上的远场分布 $F(x, y)$ 按接收光纤的导引模展开, 基模 $\psi(x, y)$ 采用高斯近似, 得到在接收通道传输光的基模比例为^[5]:

$$C_p = \frac{\iint F(r, \vartheta) \psi(r, \vartheta) dr d\vartheta}{\left(\iint F(r, \vartheta)^2 dr d\vartheta \iint \psi(r, \vartheta)^2 dr d\vartheta \right)^{1/2}} \quad (8)$$

其中, $\psi(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_{02}^2}\right)$, 在其它通道激起的基模比例也由(8)式给出, 只是基模的高斯的近似为 $\psi(x, y) = \exp\left[-\frac{x^2 + (y \pm \Delta)^2}{w_{02}^2}\right]$, Δ 是被串通道与施串通道的纤芯距。

3 结果与讨论

当接收光纤采用多模光纤, 设芯径为 $50 \mu\text{m}$ 。8 个通道的功率耦合效率及其激起的基模比例结果如表 1 所列。其中, 参数选择如下: $w_{01} = 29.013 \mu\text{m}$, $w_{02} = 7.625 \mu\text{m}$ 。

Table 1. The coupling power efficiency and the ratio of the fundamental modes excited in the multi-mode receiving fiber for eight channels ($\lambda_1 \sim \lambda_8 = 1.536 \sim 1.564 \mu\text{m}$) (%)

channel	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
coupling efficiency (%)	99.9897	99.9899	99.9897	99.9897	99.9897	99.9898	99.9898	99.9897
fundamental mode (%)	99.9870	99.9869	99.9869	99.9868	99.9867	99.9867	99.9866	99.9866

若接收光纤采用单模光纤, 设其芯径为 $8 \mu\text{m}$, 各通道的耦合效率计算结果如表 2 所列。参数如下: $w_{01} = 29.708 \mu\text{m}$, $w_{02} = 4.177 \mu\text{m}$ 。

Table 2. The coupling efficiency to eight single-mode receiving fibers ($\lambda_1 \sim \lambda_8 = 1.536 \sim 1.564 \mu\text{m}$) (%)

channel	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
coupling efficiency (%)	99.9740	99.9739	99.9738	99.9736	99.9735	99.9733	99.9733	99.9731

从计算结果看, 若接收光纤使用多模光纤, 采用二元微透镜阵列, 在理想情况下, 可使匹配耦合效率高于 99.989%, 微透镜阵列引入的匹配耦合损耗小于 0.00048 dB。在自信道激起的基模比例在 99.98% 以上, 在其它通道激起的基模在计算精度内为 0。若接收光纤使用单模光纤, 匹配耦合效率高于 99.97% 以上, 微透镜阵列引入的匹配耦合损耗小于 0.0013 dB。

以上的设计都是在忽略光纤端面菲涅耳反射损耗的情况下进行。若考虑光纤端面的菲涅耳反射损耗, 对于未镀膜的光纤端面, 在端面处理得最理想的情况下, 菲涅耳反射损耗最少可以降低到 4%, 即引入损耗 0.17 dB。若在光纤端面镀增透膜, 可以使菲涅耳反射损耗进一步消除。

由于微透镜直径有限, 不能把入射光全部收入, 存在截断损耗。设计使微透镜单元上的高斯光斑束腰是微透镜半径的三分之二, 此时截断损耗为 1.5 dB^[3]。为了使设计的二元微透镜制作时工艺上易于实现, 对微透镜连续的相位轮廓进行量化处理:

$$\phi_{\text{量化}} = \left\lfloor \frac{\phi}{(2\pi/N)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{2\pi}{N} \right\rfloor \quad (9)$$

[] 表示取整运算。

计算了 N 取 8 时第四个二元微透镜单元量化后的相位分布和衍射远场分布如图 5、图 6 所示, 可见取 8 阶量化时衍射远场与没有量化前接近, 只是周围有很小的纹波出现。

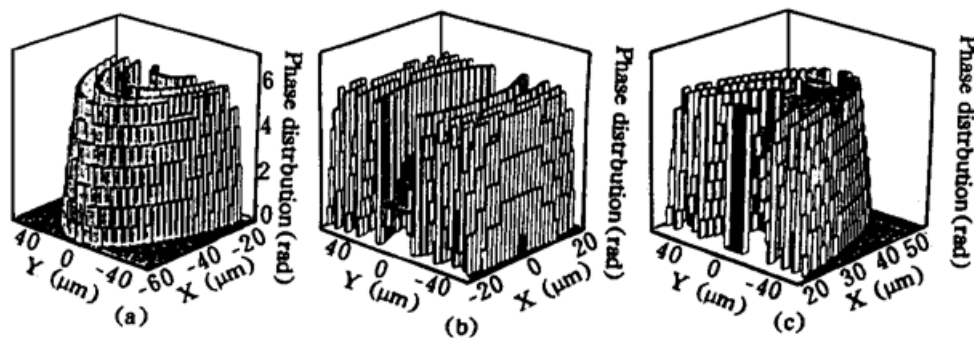


Fig. 5 The fabricated phase distribution for binary microlenses ($\lambda = 1.548 \mu\text{m}$, $D = 120 \mu\text{m}$, $\theta = 0.08^\circ$, $N = 8$). X: (a) $(-60, -18) \mu\text{m}$, (b) $(-18, 23.3) \mu\text{m}$, (c) $(23.3, 60) \mu\text{m}$, Y: $(-60, 60) \mu\text{m}$

通过工艺上多次套刻, 在器件片基表面制作出相应厚度的如阶, 入射光通过台阶时, 引入不同的光程差, 来实现二元微透镜阵列相位调制功能。根据 $\phi_{\text{量化}} = 2\pi \frac{(n-1)\delta_{\text{厚}}}{\lambda}$, 其中, n 为材料的折射率, $\phi_{\text{量化}}$ 为二元微透镜量化后的相位值, $\delta_{\text{厚}}$ 为片基表面台阶的相应厚度, 就可

以从工艺上制作二元微透镜阵列。

在实际使用时,二元微透镜阵列可以直接粘连在接收光纤阵列的端面,与光纤耦合。

结 语 本文介绍二元微透镜阵列在密集多载波波分复用器中的应用。结果表明:二元微透镜阵列应用于波分复用器可以提高耦合效率,减少微透镜阵列部分引入的损耗,改善接收光纤接收的信号质量,从而提高波分复用器件的性能。

感谢浙江大学国家现代光学仪器实验室杨国光教授和叶钧、周光亚等同志对本工作的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] D. E. Wisely, 32 channel WDM multiplexer with 1 nm channel spacing and 0.7 nm bandwidth. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(6): 520~ 521
- [2] D. R. Wisely, High performance 32 channel HDWDM multiplexer with 1 nm channel spacing and 0.7 nm bandwidth. *Proc. SPIE*, 1991, **1578**: 170~ 176
- [3] G. R. Chamberlin, A. M. Hill, Design for high density single mode wavelength-division-multiplexers. *Proc. SPIE*, 1987, **839**: 60~ 66
- [4] 夏向亮, 杨国光, 二元微透镜的位相平衡设计及叠加积分衍射分析. *光学学报*, 1994, **14**(3): 296~ 302
- [5] Christopher A. Edwards, Herman M. Presby, Corrado Dragone, Ideal microlenses for laser to fiber-coupling. *J. Lightwave Technology*, 1993, **11**(2): 252~ 257

Binary Microlenses Used in High Density Wavelength-Division-Multiplexer

Wu Xiaopin¹ Fan Chaoyang² Tang Weizhong¹ Zhou Wen¹
(1, Department of Information and Electronics; 2, Physics Department,
Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 3 April 1996; revised 20 September 1996)

Abstract Using phase balance design method and the accumulating integral method, the Binary Optical Microlenses (BOML) is designed and used in high density grating wavelength-division-multiplexers with the working wavelength of 1.536~ 1.564 μm and the channel spacing of 4 nm. The phase structure of the binary optical microlenses and the diffraction far-field distribution at the end of the receiving fibers are calculated. The loss resulted from the microlenses when the single-mode and the multi-mode receiving fiber are used, and the ratio of the fundamental modes excited in the multi-mode receiving fiber for eight channels are discussed.

Key words wavelength division multiplexer, coupling efficiency, binary optical lenses.

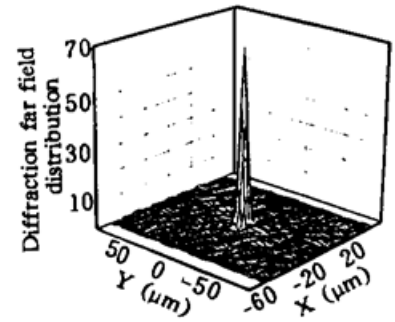


Fig. 6 The diffraction far field distribution for the fourth channel for single-mode receiving fiber ($\lambda = 1.548 \mu\text{m}$, $\theta = 0.08^\circ$, $N = 8$)