

# 用于激光到光纤最佳耦合的二元光学微透镜\*

吴小萍 汤伟中 周文

(浙江大学信息与电子工程学系 杭州 310027)

**提要** 采用位相平衡设计法设计了用于激光到光纤最佳耦合的二元光学微透镜,把二元光学微透镜看成是一种沿径向分布的特殊周期性位相结构,并用叠加积分法作了衍射分析,结果表明在不考虑光纤端面反射损耗的情况下,当用多模光纤接收时,设计的二元微透镜能使 100% 的入射激光耦合至多模光纤,在光纤中激起的基模比例为 99.60%;当用单模光纤接收时,设计的二元微透镜能使 99.95% 的入射激光耦合至单模光纤。

**关键词** 二元光学微透镜,耦合效率,光纤

## 1 引言

微透镜的激光耦合效率对于光通信、光传感等激光应用系统是十分重要的。常规的半球形微透镜激光耦合效率大约为 55%<sup>[1]</sup>。二元微透镜较之传统器件,它能把入射的光能几乎都注入主衍射级<sup>[2,3]</sup>,抑制了其余各级衍射边峰,使光纤端面上远场与光纤基模最好地耦合匹配,从而提高了耦合效率。随着近代集成电路制造技术的日益提高,工艺制作的分辨率已达到亚微米量级,这使二元微透镜的制作成为可能。本文提出采用位相平衡设计法设计用于激光到光纤最佳耦合的二元光学微透镜,用叠加积分法作衍射分析,计算了入射激光经设计的二元微透镜耦合至单模及多模光纤的耦合效率及其在接收光纤中激起的基模比例,并比较了 4 阶,8 阶和 16 阶量化情况下二元微透镜的耦合性能,并讨论了工艺上制作的可能性。

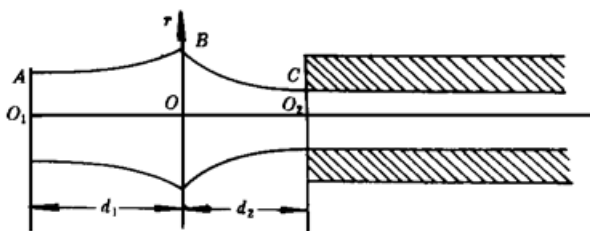


图 1 用于激光到光纤耦合的二元光学微透镜设计模型

Fig. 1 Idealization of laser to fiber coupling using binary optical microlenses

## 2 设计与分析

如图 1 所示的耦合情况,入射的高斯光束腰斑为  $\omega_{01}$ ,通过二元微透镜后,转换成腰斑为  $\omega_{02}$  的高斯光束进入光纤, $\omega_{02}$  就是光纤采用基模的高斯近似后基模应取的束斑,这样的取值可以提高入纤效率。

位相平衡设计法<sup>[4]</sup>是以球面波为基础设计二元微透镜。高斯光束从 A 点传播到 B,其相位改变

\* 浙江省自然科学基金资助项目。

为

$$P_{BA} = kz + \frac{kr^2}{2R(z)} - \eta(z) \tag{1}$$

其中,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为光波波长;  $z = O_1O$ ;  $r = OB$ ;  $R(z)$  是光束在坐标  $z$  点处的等相位面的曲率半径;  $\eta(z)$  是高斯光束在空间行进距离  $z$  时, 相对几何相移的附加相位超前;  $z_0$  为高斯光束的共焦参量。

$$R(z) = z \left[ 1 + \frac{z_0^2}{z^2} \right] \tag{2}$$

$$\eta(z) = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{z}{z_0} \right] \tag{3}$$

$$z_0 = \frac{\pi\omega_{01}^2 n}{\lambda} \tag{4}$$

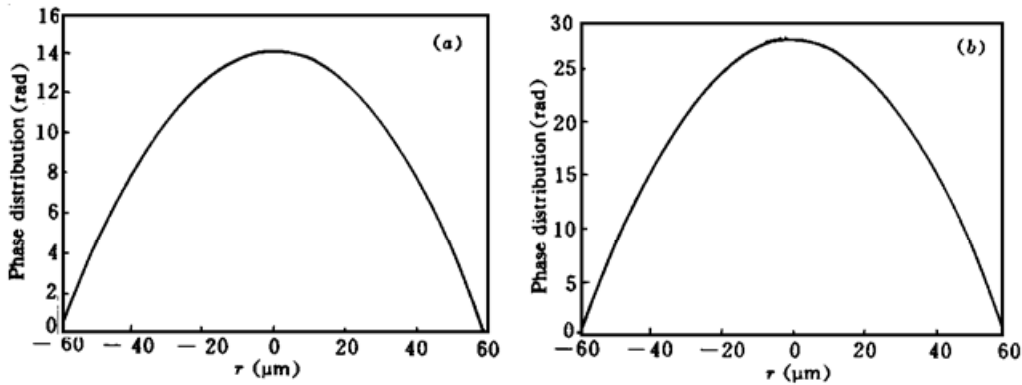


图 2 设计的二元微透镜的表面相位分布

(a) 多模接收光纤; (b) 单模接收光纤

Fig. 2 The phase distribution of binary microlenses

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

同样, 可得到经二元微透镜会聚后的高斯光束从  $B$  点到  $C$  点的相位改变。光经  $O_1 \rightarrow O \rightarrow O_2$  与经  $A \rightarrow B \rightarrow C$  传播产生的位相差, 由二元微透镜平衡。这样, 就可以设计出沿二元微透镜径向  $r$  上任意一点  $B$  的位相。图 2 所示即为 传输波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的信号, 被多模和单模接收光纤接收时微透镜的表面位相分布。

### 3 结果与讨论

如图 3 所示, 高斯光束平行入射到二元微透镜, 设在  $B$  点阵幅为  $A_0$ , 相位为  $P_0$ 。忽略二元微透镜非位相调节的厚度部分, 通过二元微透镜引入的位相改变为  $P_L$ 。采用叠加积分衍射分析。根据菲涅耳衍射定律, 像点  $I$  处的复振幅为各积分块强度贡献的矢量和, 即<sup>[5]</sup>

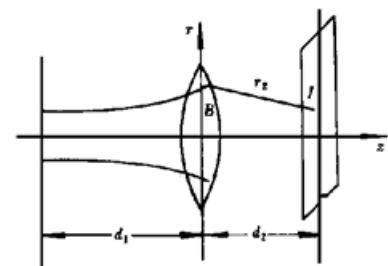


图 3 积分衍射分析

Fig. 3 The accumulating diffractive analysis

$$U(I) = \frac{1}{j\lambda} \iint A_0 \exp(jP) \frac{\exp(jkr_2)}{r_2} \frac{1 + \cos(\vec{n}, \vec{r}_2)}{2} ds \quad (5)$$

其中,  $P$  为透过二元器件面后的位相值,  $P = P_0 + P_L$ ;  $\vec{n}$  是二元器件表面外法线的单位矢量;  $\vec{r}_2$  是  $I$  点到  $B$  点矢径。由(5)式在多模和单模接收光纤入纤端面上的衍射远场分布如图4(a), (b)所示。

若接收光纤采用芯径为  $50 \mu\text{m}$  的多模光纤, 二元微透镜的焦距设计已考虑了使入射光都入射在多模光纤的临界角内, 则衍射远场被接收光纤截断部分的功率即是入纤功率, 在不考虑光纤端面反射损耗的情况下, 二元微透镜的耦合效率为 100%。

在通信干线光传输中, 较高阶数的模式比较低阶数的模式所遭受的辐射损耗更大, 此外, 微弯、随机的芯区边界扰动等给高阶模式造成的损耗也更大。如果只有一个模式或群速度几乎相等的很少几个模式携带功率, 则脉冲延迟的改进是非常大的, 这将有助于提高信道的带宽, 所以提高传输光纤的基模比例有很大的意义。

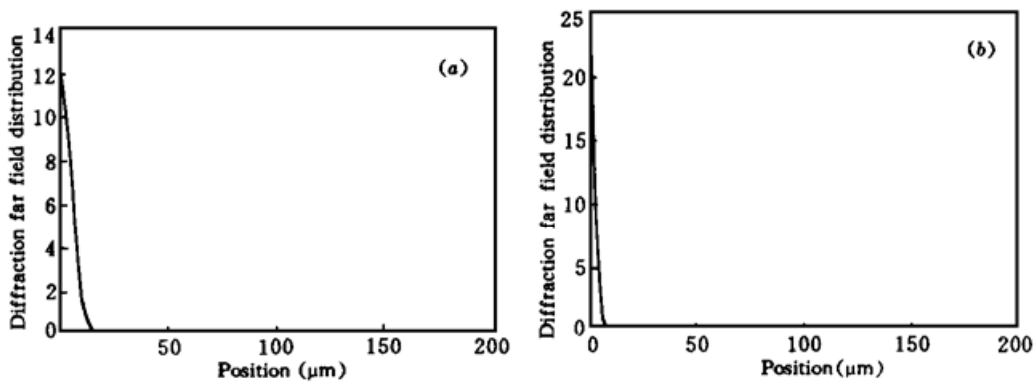


图 4 衍射远场分布

(a) 多模接收光纤; (b) 单模接收光纤

Fig. 4 The diffraction far field distribution

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

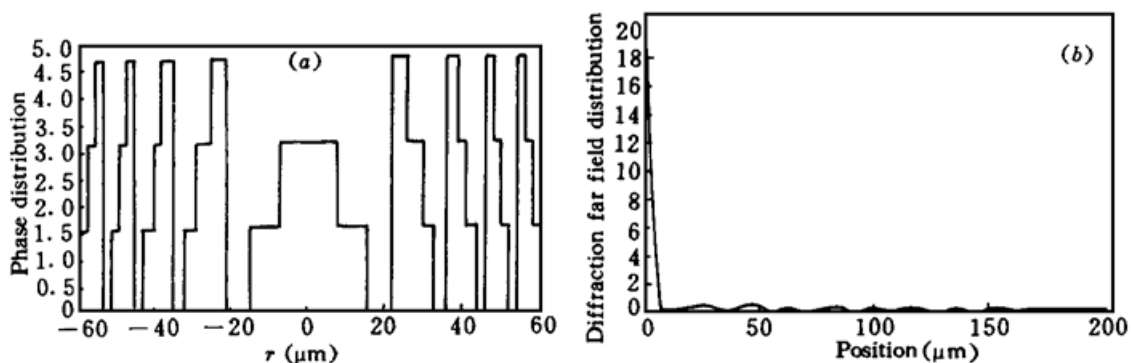


图 5 4 阶量化后二元微透镜表面位相分布 (a) 和 4 阶量化后单模接收光纤端面的衍射远场分布 (b)

Fig. 5  $N = 4$ , the phase distribution for binary microlenses (a) and  $N = 4$ , the diffraction far field distribution (b)

把图 5 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

$$C_p = \frac{\iint F(r, \vartheta) \psi(r, \vartheta) dr d\vartheta}{\left( \iint F(r, \vartheta)^2 dr d\vartheta \iint \psi(r, \vartheta)^2 dr d\vartheta \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

其中,  $F(r, \vartheta)$  为接收光纤入纤处的远场分布, 基模的高斯近似表示为

$$\psi(r, \vartheta) = k_0 \exp \left[ - \frac{r^2}{\omega_0^2} \right] \quad (7)$$

$k_0$  为与  $r, \vartheta$  无关的常数。经计算, 图 4(a) 衍射远场  $F(r, \vartheta)$  在接收光纤激起的基模比例为 99.60%。

若接收光纤采用单模光纤, 设其芯径为  $8 \mu\text{m}$ 。入射场为  $E_1$ , 单模基模场为  $E_2$ 。入射光与接收光纤的耦合效率为

$$\eta = \frac{\left| \iint_{x,y} E_1 E_2^* dx dy \right|^2}{\iint_{x,y} |E_1|^2 dx dy \iint_{x,y} |E_2|^2 dx dy} \quad (8)$$

经计算, 在不考虑光纤端面反射损耗的情况下, 二元微透镜的耦合效率为 99.95%。

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一半, 此时截断损耗为  $0.7 \text{ dB}^{[6]}$ 。以上设计假设激光器出射激光是对称圆光斑, 实际使用中出射的是椭圆光斑, 耦合效率还要乘上一个椭圆度  $M$ ,

$$M = \frac{4ab}{(a+b)^2} \quad (9)$$

其中  $a, b$  分别为椭圆光斑  $x, y$  方向的束腰。例如  $a/b = 0.8$  时, 引入的耦合损耗为  $0.2 \text{ dB}^{[6]}$ 。

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  $0.17 \text{ dB}$ 。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。

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:

$$\phi_{\text{量化}} = \left\lfloor \frac{\phi}{(2\pi/N)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{2\pi}{N} \right\rfloor \quad (10)$$

[ ] 表示取整运算。

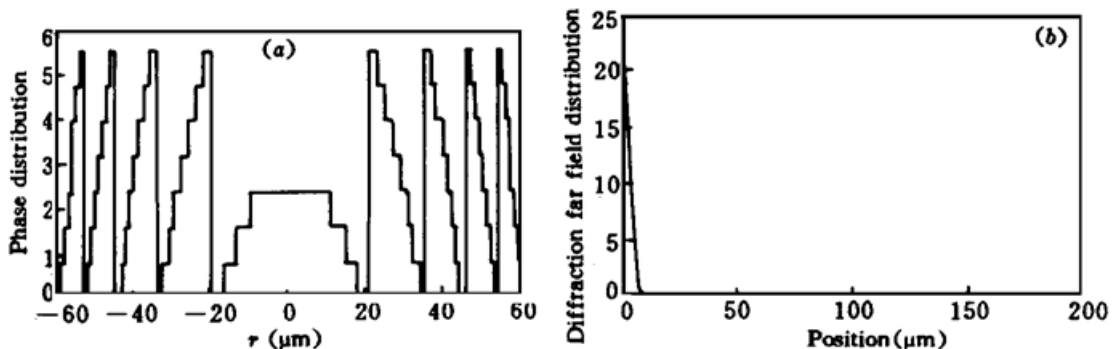


图 6 8 阶量化后二元微透镜表面位相分布 (a) 和 8 阶量化后单模接收光纤端面的衍射远场分布 (b)

Fig. 6  $N = 8$ , the phase distribution for binary microlenses (a) and  $N = 8$ , the diffraction far field distribution (b)

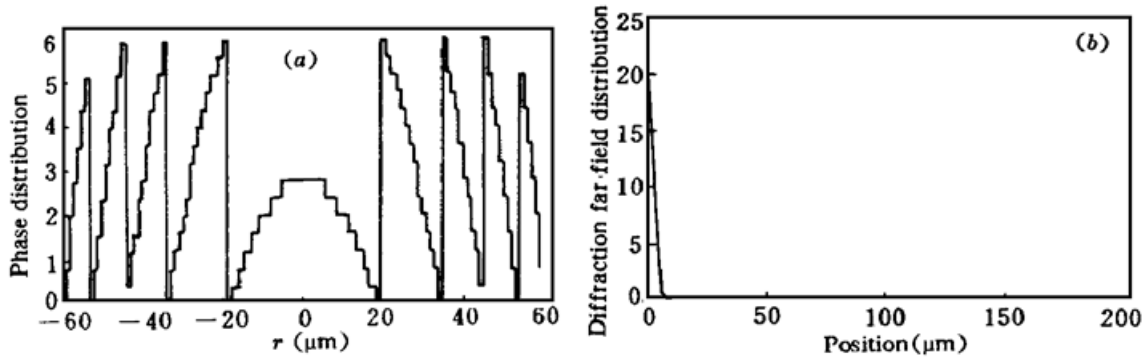


图 7 16 阶量化后二元微透镜表面位相分布 (a) 和 16 阶量化后单模接收光纤端面的衍射远场分布 (b)

Fig. 7  $N = 16$ , the phase distribution for binary microlenses (a) and  $N = 16$ , the diffraction far field distribution (b)

我们计算了  $N$  取 4, 8 和 16 时二元微透镜的相位分布及其衍射远场分布如图 5, 6, 7 所示, 可见取 4 阶量化时衍射远场有所变形。随着量化阶数的增加, 衍射远场逐渐与没有量化前接近。当  $N$  取 16 时, 衍射远场已与相位没有进行量化处理前相同。

通过工艺上多次套刻, 在器件片基表面制作出相应厚度的台阶, 入射光通过台阶时, 引入不同的光程差, 来实现二元微透镜相位调制功能。由  $\phi_{\text{量化}} = 2\pi \frac{(n-1)\delta_{\text{厚}}}{\lambda}$ 。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。这样, 就可以从工艺上制作二元微透镜。

**致谢** 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 Christopher A. Edwards, Herman M. Presby, Corrado Dragone. Ideal microlenses for laser to fiber coupling. *J. Lightwave Technology*, 1993, **LT-11**(2) : 252
- 2 Brian K. Jennison, Jan P. Allebach. Direct binary search computer-generated holograms: an accelerated design technique and measurement of wavefront quality. *Proc. SPIE*, 1989, **1052** : 2
- 3 周光亚, 侯西云, 杨国光. 微透镜的衍射成像分析. *光子学报*, 1994, **23**(z2) : 157
- 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
- 5 J. W. 顾德曼. 傅里叶光学导论. 北京: 科学出版社, 1979, 232
- 6 G. R. Chamberlin, A. M. Hill. Design for high density single mode wavelength-division-multiplexers. *SPIE*, 1987, **839** : 80

## Binary Optical Microlenses for Coupling of Lasers to Fibers

Wu Xiaoping Tang Weizhong Zhou Wen

(Department of Information and Electronics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** Ideal Binary Optical Microlenses (BOML) are designed using a phase balance design method, the accumulating integral method is used to analyze the BOML's diffractive result. Properly coated, the lenses of the new design have a theoretical coupling efficiency of 100%. 99.60% excited fundamental mode in the multi-mode receiving fiber and a 99.95% coupling efficiency in the single-mode receiving fiber would be expected.

**Key words** binary optical microlenses, coupling efficiency, fibers