

二元纯位相片实现半导体激光器到单模光纤的耦合*

吴小萍¹ 范朝阳² 周文³

- 1, 清华大学电子系, 北京 100084
- 2, 浙江大学物理系, 杭州 310027
- 3, 浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027

摘 要 采用二元光学位相调制的基本思想, 用二元纯位相型光学系统将椭圆高斯型激光束与单模光纤最佳耦合。采用两块纯位相片来进行波前变换, 将椭圆型高斯激光束转变成对称圆高斯激光束, 并与单模光纤的基模最佳匹配耦合。

关键词 位相调制, 二元纯位相片, 耦合效率。

1 引 言

在光通信中, 一般在半导体激光器上进行输出信号的调制, 再由半导体激光器耦合到单模光纤。因此, 半导体激光器到单模光纤的耦合效率, 对光通信系统的设计是十分重要的。由于半导体激光器有源区端面的长方形结构^[1], 实际输出的激光束具有椭圆高斯型强度分布, 在 x 、 y 两个方向上发散角差别很大, 这样会影响激光器与一般圆对称结构单模光纤的耦合效率, 实验中测得的耦合效率大约只有 20%~30%。特别是对于大光腔半导体激光器, 耦合效率更低, 这大大影响了光通信系统的性能。人们用了各种方法来提高耦合效率^[2], 本文介绍采用两块纯位相片, 将椭圆型高斯激光束与单模光纤最佳耦合, 较之传统的利用光学透镜组耦合的方法, 具有耦合效率高, 系统小型化, 有可能批量生产等优点。

2 设计与分析

椭圆高斯光束的基模有如下形式^[3]

$$A(x, y, z) = A_0 \left(\frac{w_{0x} w_{0y}}{w_x w_y} \right)^{1/2} \exp \left[- \left(\frac{x}{w_x} \right)^2 - \left(\frac{y}{w_y} \right)^2 \right] \exp \left\{ -i \left[kz + k \left(\frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} \right) - \mathcal{Q}(z) \right] \right\} \quad (1)$$

式中 A_0 是与 x 、 y 和 z 无关的常数, w_{0x} 、 w_{0y} 为椭圆高斯型激光在 x 、 y 方向的两个特征束腰。从式中的可以看出, 椭圆型高斯光束在 x 、 y 两个方向上的各分量是完全独立的, 有各自不同的

* 浙江省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-01-30; 收到修改稿日期: 1997-04-21

w_i 、 R_i 和 z_i ($i = x, y$), 可以把它们各自看成属于不同的对称圆高斯光束, 把对称圆高斯光束的有关结果推广用于椭圆高斯光束。以下的设计假定半导体激光器光源输出的椭圆型高斯激光束, 参数如下; $w_{01x} = 1.55 \mu\text{m}$, $w_{01y} = 5.65 \mu\text{m}$ 。

要使入射光场与单模光纤最佳耦合, 必须使振幅与相位都匹配。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 , 则入射光与接收光纤的耦合效率为:

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

采用同轴的两个位相片, 刻在同一光学玻璃左右两面上, 如图 1 所示。从半导体激光器 LD 发出的椭圆高斯型激光束传输距离 d_1 后, 在 H_1 位相片上 x 、 y 两方向的光斑大小分别为 w_{1x} 、 w_{1y} ; 经过在光学玻璃介质中传播距离 d 后, 在 H_2 位相片上光斑在 x 、 y 两方向分别为 w_{2x} 、 w_{2y} 。设输入光束经过 H_1 位相片的位相调制, 在距离 H_1 位相片 x 处, 呈现 x 方向的腰斑 w_{0x} ; 在距离 H_1 位相片 y 处, 呈现 y 方向的腰斑 w_{0y} 。设计的目标就是要找一个位置, 在这个位置上 x 、 y 方向光斑大小相等, 即光场在振幅上呈对称圆高斯分布, 但相位还不能满足与接收光纤的最佳匹配条件, 在这个位置上放置 H_2 位相片使继续进行波前变换, 最终使相位满足最佳匹配条件。

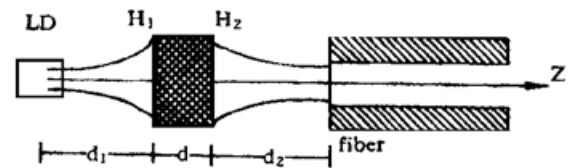


Fig. 1 Two pieces of phase-only masks for coupling of elliptical Gaussian beam to single-mode fiber

首先确定 H_1 位相片的位置与 x 方向的腰斑 w_{0x} 的距离 x 及 y 方向的腰斑 w_{0y} 的距离 y , 使通过 H_1 位相片后的光束在 H_2 位相片上强度分布呈对称圆高斯光束。取出射激光束束腰到 H_1 距离 d_1 为 $500 \mu\text{m}$, H_1 到 H_2 的距离 d 为 $3000 \mu\text{m}$, $w_{1x} = 133.5 \mu\text{m}$, $w_{1y} = 37.1 \mu\text{m}$, $w_{2x} = w_{2y} = 60 \mu\text{m}$, 由高斯光束的传输理论解得 $x = 5383.2 \mu\text{m}$, $y = -2342.1 \mu\text{m}$, $w_{02x} = 11.6 \mu\text{m}$, $w_{02y} = 29.0 \mu\text{m}$ 。

位相平衡设计法^[4]是以球面波为基础来进行纯位相光学元件的设计。对于某一特定的入射光波, 具有光波波前 P_0 , 通过一个纯位相光学元件后, 位相得到调制, 出射光波波前发生变化, 使之传输到输出面上呈现所要求的振幅、相位分布, 由此实现所需的光学功能。输出光束所需要具备的光波波前与输入光束已经具有的光波波前之间的相位差, 由纯位相光学元件 H_1 、 H_2 来平衡。输入光束通过 H_1 位相片后, 在 H_1 位相片右边所应具有的位相分布为

$$P_1 = -k(w_{0x}^2/2R_{1x} + w_{0y}^2/2R_{1y}) \quad (3)$$

输入光束通过设计的 H_1 位相片, 在光学玻璃中传输距离 d 后, 在 H_2 位相片左边已经具有的位相分布为

$$P_2 = k(w_{0x}^2/2R_{2x} + w_{0y}^2/2R_{2y}) \quad (4)$$

其中

$$R_{ki} = z(1 + z_{0i}^2/z^2), \quad z_0 = \pi w_{0i}^2 n/\lambda, \quad (k = 1, 2; i = x, y) \quad (5)$$

当 $k = 1, i = x$ 时, $z = x$; 当 $k = 1, i = y$ 时, $z = y$; 当 $k = 2, i = x$ 时, $z = d - x$; 当 $k = 2, i = y$ 时, $z = d - y$ 。

H_1 、 H_2 位相片所应引入的位相分布 ϕ_1 、 ϕ_2 为

$$\phi_1 = P_1 - P_{H10}, \quad \phi_2 = P_{H20} - P_2 \quad (6)$$

式中 P_{H10} 为入射的椭圆高斯型激光束传输到 H_1 左边位置时的相位, 而 P_{H20} 是单模接收光纤基模向左逆传播到 H_2 位相片右边时的相位分布。这样, 就可确定 H_1 、 H_2 位相片所应引入的位相分布 ϕ_1 、 ϕ_2 。根据费涅尔衍射定律^[5], 输出面上任一象点 I 处的复振幅为输入面各积分块强度贡献的矢量和, 即

$$U(I) = \frac{1}{j\lambda} \iint A_0 \exp(jP) \frac{\exp(jkr)}{r} \frac{1 + \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r})}{2} ds \quad (7)$$

式中输入面上任一点 B 点的光场振幅为 A_0 , 相位为 P , \mathbf{n} 为输入面外法线的单位矢量, \mathbf{r} 为 I 点到 B 点的矢径。

3 结果与讨论

采用叠加积分法作衍射远场分析, H_2 到单模接收光纤端面的距离 d_2 为 $876.2 \mu\text{m}$, 光学玻璃折射率取 1.45, λ 取 $1.3 \mu\text{m}$ 。 H_1 、 H_2 位相片的位相分布如图 2(a)(b) 所示。图 2(c) 为 H_2 位相片上的振幅分布, 可见通过 H_1 位相片的位相调制, 在 H_2 位相片上远场呈 w 为 $60 \mu\text{m}$ 的对称圆高斯光束。图 2(d) 是光纤端面上的远场光振幅分布, 它与单模光纤基模的均方误差已达到 3.415×10^{-5} , 可见, 通过 H_2 位相片的位相补偿, H_2 位相片上 w 为 $60 \mu\text{m}$ 的对称高斯光束被转化为 w 为 $4.177 \mu\text{m}$, 与单模接收光纤在幅度、相位上都匹配的高斯光束, 并可以算得由半导体激光器到单模光纤的耦合效率为 99.9956%。

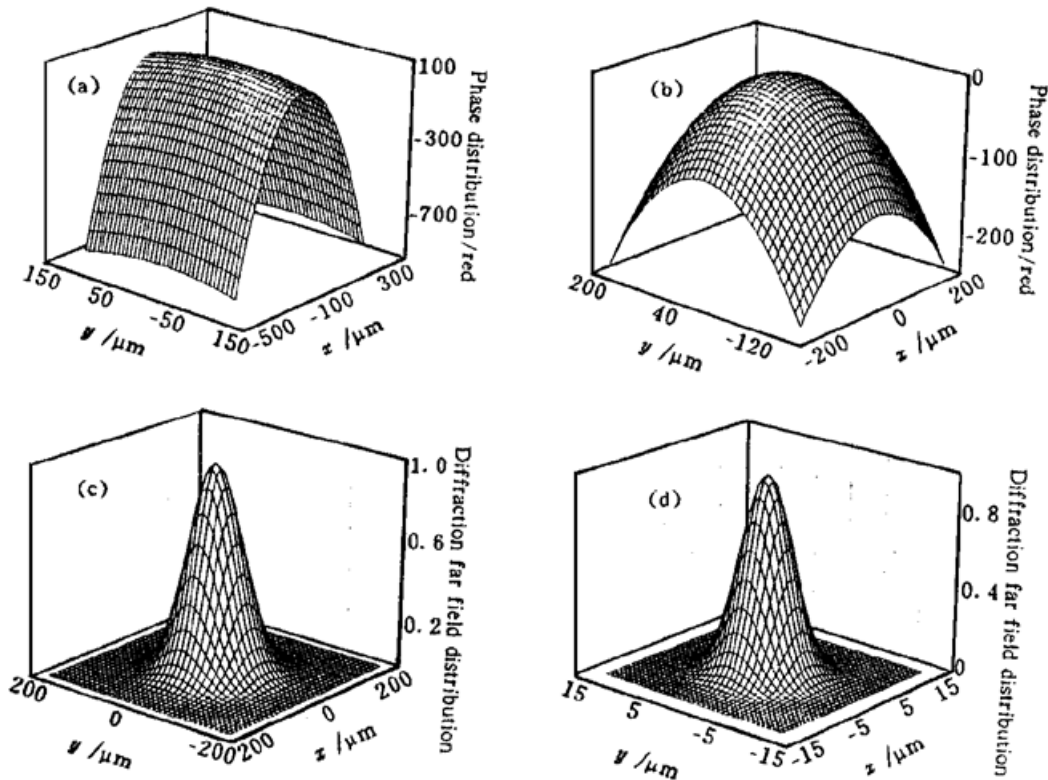


Fig. 2 (a) Phase distribution of H_1 ; (b) Phase distribution of H_2 ; (c) far-field distribution on H_2 ; (d) far-field distribution on the end face of the receiving fiber

为了使纯位相系统在工艺上能够实现, 对连续分布的位相函数进行量化处理, 对 H_1 位相片的相位分布进行 8 阶量化, 其量化后的相位分布在 x 方向、 y 方向的截面如图 3(a1)(b1) 所示。在 x 方向, 为使图线看得更清楚, 只画出了一半, 其左右是对称结构。输入光束通过

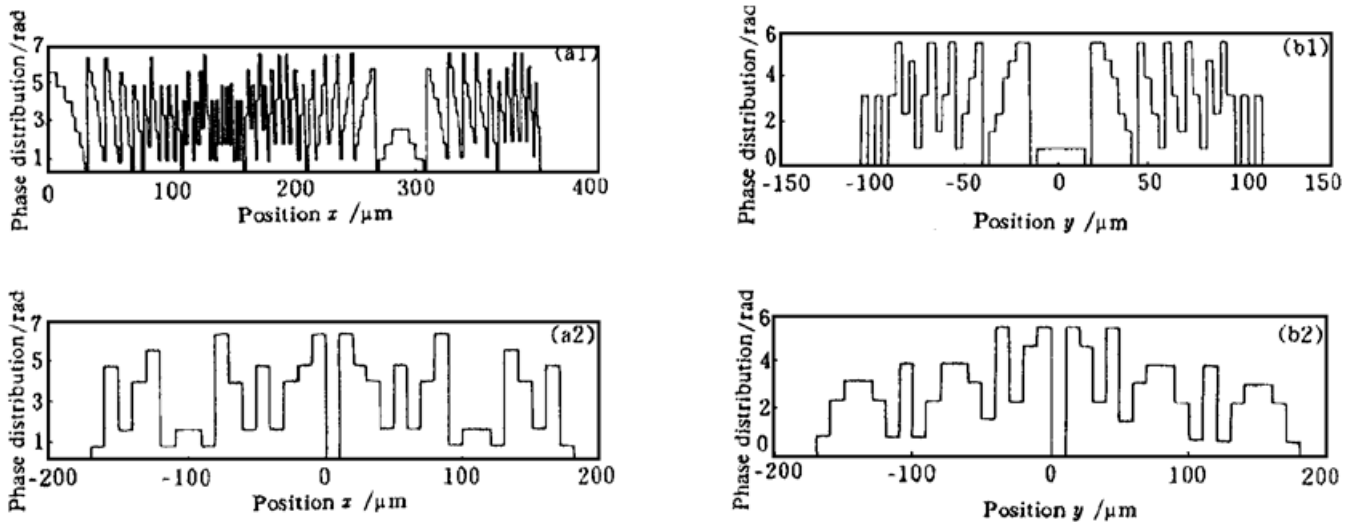


Fig. 3 (a1) Phaser distribution on x direction for 8-level relief structure of H_1 (symmetric, only half); (b1) Phase distribution on y direction for 8-level relief structure of H_1 ; (a2) Phase distribution on x direction for 8-level relief structure of H_2 ; (b2) Phase distribution on y direction for 8-level relief structure of H_2

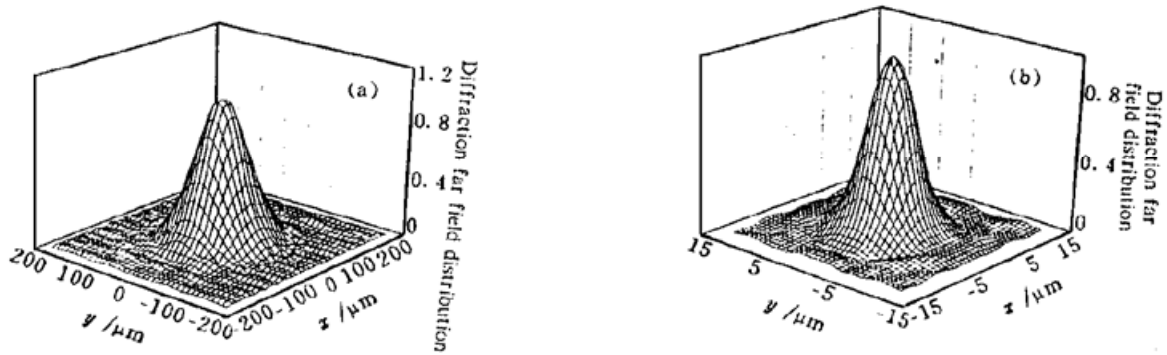


Fig. 4 (a) Far-field distribution on H_2 for 8-level relief structure of H_1 and H_2 ; (b) Far-field distribution on the end face of receiving fiber for 8-level relief structure of H_1 , H_2

H_1 位相片量化后的相位分布, 传输到 H_2 所具有的振幅分布如图 4(a) 所示, 从图中可见, 在 H_2 位相片处输出光还是呈均匀对称高斯分布, 但是在边缘有微小的起伏, 这是量化误差引起的。同样, 入射光束通过量化后的 H_1 位相片, 传输到 H_2 位相片左边具有的相位分布, 就是 P_0 ; 而当与接收单模光纤的基模最佳匹配时, 要求在 H_2 面上所具有的要相位分布, 就是 P_e 。两者的差就是所要设计的补偿 H_2 输出面上光的位相分布, 也就是使光通过 H_2 之后与接收光纤最佳耦合的 H_2 位相片的位相分布。把这个连续的位相分布进行量化, 最后得到 8 阶量化后 H_2 位相片的位相分布如图 3(a2) (b2) 所示, 这是在 x 、 y 两方向的相位分布截面图。图 4 (b) 是 H_1 、 H_2 量化后在光纤端面的远场图。对于 8 阶量化, 由半导体激光器到单模光纤的耦合效率计算值为 94.3642%。结果表明量化误差对 H_2 处和光纤端面处输出波形稍有影响, 使在边缘有小的边峰出现, 对系统的能量耦合效率的影响主要是由于沿轴向有 1 级光、2 级光、……的存在。

以上的衍射远场模拟都是在假设光源是椭圆高斯光束的情况下进行的, 在实际使用中, 光源会与假设的情况有一定的偏移。此外, 温度等个别因素的影响, 也会影响 H_1 、 H_2 位相片的相对位置, 使每一点的位相调制不完全精确, 这样, 实际的耦合效率会比理论值小一些。由于 H_1 、 H_2 位相片有一定的大小, 不能把入射光全都接收, 这样在输入面和输出面上都存在

截断误差,但在实际使用中,选用的位相片的尺寸总是远大于入射光斑大小,所以其影响几乎可忽略;又考虑到费涅耳反射损耗,理想情况下每个反射面损耗为4%,相当于0.17 dB,在 H_1 、 H_2 及光纤端面三个反射面上都存在,这也会引起耦合效率比理论值有所下降。

将半导体激光器输出的椭圆型高斯光束转换成圆对称型并将其与单模光纤最佳耦合,必须同时满足相位和幅度的匹配条件。若半导体激光器由于工艺制作缺陷,使出射端面相位与前面分析的理想情形有偏差,也可以通过适当调整二元位相片的位相分布来抵消。此外,应尽量减少端面及光纤内部背向散射的光反馈,以尽量避免影响光源器件的光谱特性,使之稳定工作。这可以采用在拉锥后的光纤端面镀增透膜和接入有尾纤的光隔离器等方法,分别消除光纤前端和远端及内部背向散射光的影响。出射光束的束腰可能在端面之内,也可能在端面之外,上述方法对出射光束束腰在半导体激光器有源区端面内外任何位置都适用。实际使用中,两个纯位相片既可以放在半导体激光器腔体外,直接粘连在接收光纤上,也可以固定在外腔式半导体激光器腔体内。

参 考 文 献

- [1] 郭长志, 半导体激光模式理论. 北京, 人民邮电出版社, 1989: 239~ 251
- [2] Christopher A. Edwards, Herman M. Presby, Corrado Dragone, Ideal microlenses for laser to fiber coupling. *J. Lightwave Technology.*, 1993, **11**(2): 252~ 257
- [3] 吕百达, 激光光学/激光束的传输变换和光束质量控制. 成都, 四川大学出版社, 1992: 118~ 120
- [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] 黄婉云, 傅里叶光学教程. 北京, 北京师范大学出版社, 1984: 115~ 119

Binary Phase-Only Masks for Coupling of Semiconductor LD to Fiber

Wu Xiaoping¹ Fan Chaoyang² Zhou Wen³

1, *Electronics Department, Tsinghua University, Beijing 100084*

2, *Physics Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027*

3, *Department of Information and Electronics, Zhejiang University, Hangzhou 310027*

(Received 30 January 1997; revised 21 April 1997)

Abstract Based on the phase modulation of binary optics, the binary phase-only masks are used to couple the elliptical Gaussian beam to single-mode fiber. By the wavefront conversion of the beam, two pieces of the phase-only masks are used to transform the elliptical Gaussian beam to symmetric Gaussian beam, and then coupled well with the single-mode receiving fiber.

Key words phase modulation, binary phase-only mask, coupling efficiency.