

文章编号: 1001-3806(2005)01-0059-03

斜端面光纤耦合效率理论与实验研究

谭旭东^{1,2}, 任 钢¹, 蔡邦维¹, 乔裔明²

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064; 2. 武汉电信器件公司, 武汉 430074)

摘要: 应用场耦合方法模拟计算了不同光纤斜端面角度下半导体激光器的耦合效率, 并进行了实验测量。结果表明, 不同的光纤斜端面角度下, 对半导体激光器的耦合效率影响很大, 根据不同的芯片参数合理选择不同的斜端面光纤可以得到尽可能高的耦合效率。

关键词: 斜端面光纤; 半导体激光器; 耦合效率; 端面反射

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Theoretical and experimental study on coupling efficiency of LD at different fiber inclined surface

TAN Xu-dong^{1,2}, REN Gang¹, CAI Bang-wei¹, QIAO Yi-ming²

(1. College of Electronics Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Wuhan Telecommunication Device Company, Wuhan 430074, China)

Abstract: Using field coupling theory, the coupling efficiency of LD at different fiber inclined surface is discussed, and experimental results are presented too. The results show that the coupling efficiency is affected obviously by the fiber inclined angle, which can be improved if we choose the angle properly.

Key words: inclined surface fiber; LD; coupling efficiency; surface reflection

引 言

追求高的器件耦合效率是光通信器件生产厂商的目标之一, 目前普遍存在着半导体激光器出纤功率偏低的问题, 其中一个重要的限制因素就是芯片到光纤的耦合效率做不大。而大的耦合效率对提高输出功率、加大传输距离、降低成本都有着重要的意义, 故如何提高耦合效率一直是光通信中的重点研究内容^[1,2]。另一方面, 有效地抑制反射对高速调制半导体激光器非常重要, 因为反射不但引进不必要的噪声, 同时会使激光器的 $P-I$ 线性变差^[3], 从而导致调制信号发生畸变。另外, 反射引进的噪声也会导致波长的漂移和光谱的变宽^[4], 从而对要求窄线宽的场合尤其是 DWDM 系统是非常有害的。

作者主要讨论光纤头的影响, 由于存在菲涅耳反射, 导致光纤头端面处的回波反射影响激光器的性能, 而激光器一般工作于高速小信号调制状态, 回波的微小功率都会影响调制的准确性。故端面讨论的重点在

于找到一个合适的倾斜角度, 使得在保证高耦合效率的情况下又能使回波损耗达到最大。由于在半导体激光器以及单模光纤的情况下, 几何光线光学已不再适用, 应严格用波动光学理论进行分析^[5], 作者从场耦合方程出发, 推导了不同光纤斜端面 (角度下半导体激光器的耦合效率, 以及考虑了菲涅耳反射的情况下耦合效率的表达式, 并做了实验。所得结论对提高半导体激光器的耦合效率有一定的实用价值。

1 理论模型

作者的主要目的是讨论光纤斜端面角度对半导体激光器耦合效率的影响, 所以认为光纤与激光器之间的一些单元器件如透镜等只起光束变形和会聚的作用, 把半导体激光器的出射光变换传输到光纤的端面上去, 简化了中间的光束传输过程, 但不影响对光纤斜端面效应主要问题的讨论。所以可以建立如图 1 所示的简化模型。

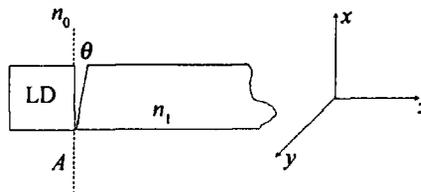


Fig 1 Smlplified configuration of LD coup ling system

作者简介: 谭旭东 (1977-), 男, 硕士, 主要从事激光与光通信技术的研究。

E-mail: 303txd@163.com

收稿日期: 2003-12-25; 收到修改稿日期: 2004-04-05

2 不考虑菲涅耳反射的情况

半导体激光器输出的归一化场分布为^[6]:

$$\phi = \left[\frac{2}{\pi w_x w_y} \right]^{1/2} \times \exp \left[- \left(\frac{x^2}{w_x^2} + \frac{y^2}{w_y^2} \right) + ik \left(\frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} \right) \right] \quad (1)$$

光纤的归一化场分布为:

$$\Psi = \frac{2}{\pi} \frac{1}{w_f} \exp \left[- \frac{x^2 + y^2}{w_f^2} + ik \frac{x^2 + y^2}{2R_f} \right] \quad (2)$$

式中, $w_x, w_y, w_f, R_x, R_y, R_f$ 分别为半导体激光器和光纤在垂直光传播路径上任一平面处的光斑半径以及波前曲率半径。其中束腰半径的典型值为: $w_{0x} = 0.7 \mu\text{m}$, $w_{0y} = 1.6 \mu\text{m}$, $w_{0f} = 4.5 \mu\text{m}$ 。光传输路径上的光斑半径与束腰半径的关系可以通过下面的关系求到:

$$w_x(z) = w_{0x} \left[1 + \frac{\lambda(z + \alpha)^2}{\pi w_{0x}^2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$w_y(z) = w_{0y} \left[1 + \left(\frac{\lambda(z - \alpha)}{\pi w_{0y}^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中, α 为半导体激光器的像散, 即 2α 是两束腰间的距离。由于问题的讨论重点是光纤斜端面, 故认为 (1) 式和 (2) 式中的 w_x, w_y, w_f 即取典型的 w_{0x}, w_{0y}, w_{0f} 值。

可使用透镜变换使激光场和光纤场的束腰在同一个平面上, 以实现图 1 的模型。此时认为 $R_x \rightarrow \infty$, $R_y \rightarrow \infty$, 则 (1) 式可以写成:

$$\phi = \left[\frac{2}{\pi w_x w_y} \right]^{1/2} \exp \left[- \left(\frac{x^2}{w_x^2} + \frac{y^2}{w_y^2} \right) \right] \quad (5)$$

单考虑偏振在 x 方向上的基横模场 (即 TE 模), 半导体激光场由虚面 A 传播到光纤斜端面上时, 传播的距离为 $\Delta z = x \tan \theta$, 位相变化为 $k\Delta z$, 故光纤斜端面前半半导体激光场的表达式为:

$$\phi_{in} = \left[\frac{2}{\pi w_x w_y} \right]^{1/2} \exp \left[- \left(\frac{x^2}{w_x^2} + \frac{y^2}{w_y^2} \right) \right] \times \exp(-ikx \cdot n_0 \cdot \tan \theta) \quad (6)$$

光纤内场在斜端面场的分布可以写为:

$$\Psi = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{w_f} \exp \left[- \frac{x^2 + y^2}{w_f^2} \right] \times \exp[ik \cdot n_1 \cdot (L \tan \theta - x \tan \theta)] \quad (7)$$

考虑半波损失和忽略光纤很小斜角的离轴影响, 半导体激光场在光纤斜端面的反射场为:

$$\phi_r = \left[\frac{2}{\pi w_x w_y} \right]^{1/2} \exp \left[- \left(\frac{x^2}{w_x^2} + \frac{y^2}{w_y^2} \right) \right] \times$$

$$\exp(-ikx \cdot n_0 \cdot \tan \theta + i\pi) \quad (8)$$

由此得到, 在不考虑菲涅耳反射的情况下, 激光场进入光纤的耦合效率为:

$$\eta_f = \left| \iint \Psi \cdot \phi_{in} \, dx dy \right|^2 = \left[\frac{4}{\left(\frac{w_f}{w_x} + \frac{w_x}{w_f} \right) \left(\frac{w_f}{w_y} + \frac{w_y}{w_f} \right)} \right] \times \exp \left[- \frac{2\pi^2 (n_0 - n_1)^2 \cdot \tan^2 \theta}{\lambda^2 \left(\frac{1}{w_x^2} + \frac{1}{w_f^2} \right)} \right] \quad (9)$$

当 $\theta = 0$ 时, 得到与文献上相一致的输出耦合效率公式^[7]:

$$\eta = \frac{4}{\left(\frac{w_f}{w_x} + \frac{w_x}{w_f} \right) \left(\frac{w_f}{w_y} + \frac{w_y}{w_f} \right)} \quad (10)$$

反射场与入射场的耦合为:

$$\eta_r = \left| \iint \phi_r \cdot \phi_{in} \, dx dy \right|^2 = \exp \left[- \frac{4\pi^2 n_0^2 \cdot w_x^2 \cdot \tan^2 \theta}{\lambda^2} \right] \quad (11)$$

3 考虑菲涅耳反射的情况

实际上菲涅耳反射是存在的, 假设进入光纤的折射角为 θ_1 , 与入射角的关系为 $n_0 \sin \theta = n_1 \sin \theta_1$, 则得到考虑了菲涅耳反射时的耦合效率为:

$$\eta_f = \frac{4n_0 \cdot n_1 \cdot \cos \theta \cos \theta_1}{(n_0 \cos \theta + n_1 \cos \theta_1)^2} \times \left[\frac{4}{\left(\frac{w_f}{w_x} + \frac{w_x}{w_f} \right) \left(\frac{w_f}{w_y} + \frac{w_y}{w_f} \right)} \right] \times \exp \left[- \frac{2\pi^2 (n_0 - n_1)^2 \cdot \tan^2 \theta}{\lambda^2 \left(\frac{1}{w_x^2} + \frac{1}{w_f^2} \right)} \right] \quad (12)$$

$$\eta_r = \left[\frac{n_0 \cos \theta - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta + n_1 \cos \theta_1} \right]^2 \times \exp \left[- \frac{4\pi^2 n_0^2 \cdot w_x^2 \cdot \tan^2 \theta}{\lambda^2} \right] \quad (13)$$

4 模拟计算及实验结果

一般期望 η_f 尽可能的大, 以便得到大的出光功率, 同时期望 η_r 尽可能的小, 以便可以避免反射光对半导体激光器造成影响, 减少噪声的引进。利用考虑菲涅耳反射的 (12) 式和 (13) 式进行模拟计算, 其结果如图 2 所示, 取模场半径均为 $4.5 \mu\text{m}$, 即激光光斑圆化及模场匹配的情况。使用的数据为 $n_0 = 1.0$, $n_1 = 1.46$, $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 。

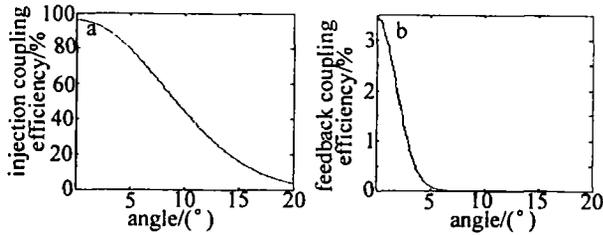


Fig 2 Coupling efficiency at different angle

图 2a 表示进入光纤的效率,图 2b 表示反射与激光场耦合的效率。可以看出,如果要求较大的输出耦合效率,势必引起反射也加大,这样将会对半导体激光器造成很大的噪声。

图 2 中假设 $w_x = w_y = w_f$,实际上三者差别很大。可取各束腰的典型值为: $w_x = 0.7\mu\text{m}$, $w_y = 1.6\mu\text{m}$, $w_f = 4.5\mu\text{m}$,由这 3 个数据做出图 3。

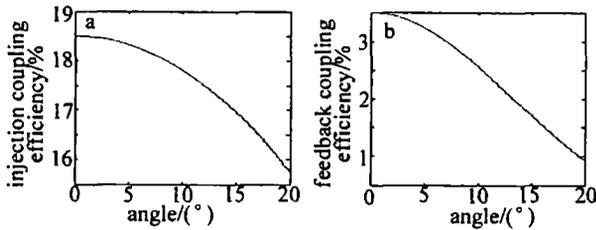


Fig 3 Coupling efficiency at different angle

由图 3 可以看出,如果三者不等,引起的损耗将会大幅度增加。模拟计算得到的输出耦合效率在光纤斜角度为 0 时只有 18.5%,而同样应用上述光斑的 3 个数据由 (10) 式计算得到的输出耦合效率是 19.2%,这个数据比模拟计算得到的 18.5% 偏大,可以认为是它忽略了端面的菲涅耳反射所致。

图 2 和图 3 均表明:如果光纤端面的斜角度过大,入射光场会较大地偏离单模光纤的中心轴,从而导致能量的大幅度损失,使得输出的功率耦合效率变得更小。因此,要根据不同的芯片情况来选择需要打磨的光纤端面的斜角度。

实验结果见表 1,实验中采用的是 DFB 型激光器芯片,阈值电流为 12mA,工作电流为 25mA,垂直和水平发散全角分别为 30° 和 25° 。模拟和实验的数据出入在于模拟中不能得到真实的激光器参数,但模拟和实验的数值趋势是一样的,同样有指导意义。

Table 1 Experiment data of LD coupling

inclined angle/ $^\circ$	fiber output power/mW	experimental coupling efficiency/%	theoretical coupling efficiency/%
5	2.3	74.2	79
	2.0	64.5	
	2.2	71.0	
8	1.6	51.6	57
	1.0	32.3	
	1.5	48.4	

由于焊接的不均匀性,不能保证焊接后光纤与激

光器能保持在最佳的耦合位置。图 4~图 6 分别显示了实验上耦合在 x, y, z 方向上的允差曲线。

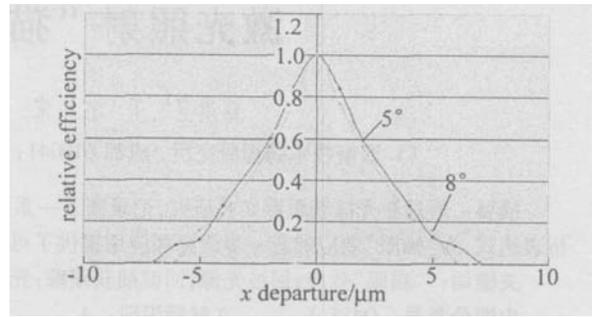


Fig 4 Different efficiency in x direction

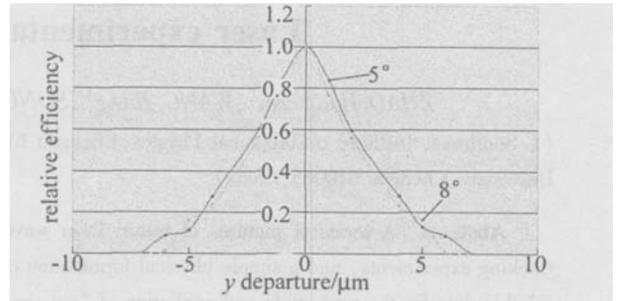


Fig 5 Different efficiency in y direction

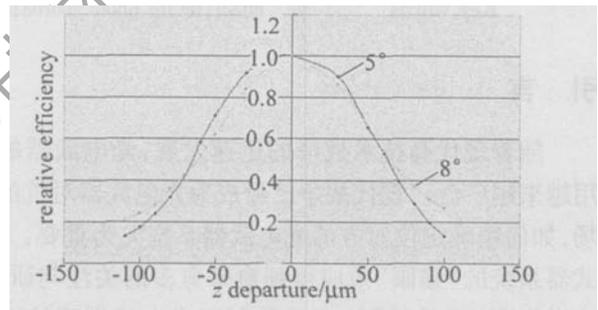


Fig 6 Different efficiency in z direction

从图中可以看出, x, y, z 3 个方向的允差曲线差别较大:在 x, y 方向很敏感,稍微偏离耦合的最佳位置其效率即迅速下降;而 z 方向上则可以有一个较大的允差范围。

5 讨论

不同的光纤端面斜角度下,器件的输出耦合效率差别很大;适当的选择光纤端面倾斜角度,既可以保证有较高的耦合效率,又可以有效地降低回波反射对激光器的影响。

在激光器 x, y 方向发散角相差较小的情况下,把光纤端面加工成 5 角时可以获得较大的耦合效率,并且可以减少反射光的影响。

在耦合焊接过程中,耦合效率对光纤的位置很敏感。在作者所做的实验中, x, y 方向上如果保持耦合效率的变化不超过 50%,则这两个方向上的位置偏移不能大于 $2\mu\text{m}$,而在 z 方向上则可以在 $50\mu\text{m}$ 的范围内变化。因此,五维微调架必须在 x, y 方向上设计

(下转第 89 页)

$$m_c = \frac{\sum_{m,n} I_{mn} m_{mn}}{\sum_{m,n} I_{mn}}, n_c = \frac{\sum_{m,n} I_{mn} n_{mn}}{\sum_{m,n} I_{mn}} \quad (8)$$

式中, m, n 是屏幕像元序号。

2 实验数据及分析

2.1 精度分析

利用标定后的测试系统,对光斑沿 x, y, z 3 个方向的位移进行测量,测量精度达到了 2%,具体数据列于表 1 中。

Table 1 Displacement measuring data and precision

Table 1 Displacement measuring data and precision								
x/ mm	standard	2.5	5.0	7.5	10.0	13.5	17.0	20.5
	measure	2.6	5.1	7.6	9.9	13.3	16.8	20.2
	error	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3
y/ mm	standard	12.5	22.5	44.5	68.0	86.5	106.3	148.5
	measure	12.4	22.8	44.2	67.5	86.2	105.5	147.6
	error	-0.1	0.3	-0.3	-0.5	-0.3	-0.8	-0.9

2.2 光斑形状影响

如图 3 所示,不同形状的光斑对中心位置的确定有一定影响。利用 (8) 式来确定光斑中心位置,可以适当修正这一影响。



Fig 3 Image of different form spot on CCD

对图 3 所示形状的不同尺寸光斑进行了实际测试。这里取了 3 种形状 (椭圆形、方形、三角形) 和 3 种尺寸光斑,设计光斑中心坐标 x, y, z 是 $(-8.20\text{mm}, 916.00\text{mm}, -9.20\text{mm})$,测量数据列于表 2。由测量

数据可见,光斑中心位置坐标受形状和尺寸影响得到一定改善。

Table 2 Center coordinate of different form and measure spot

form	size/mm	x/mm	y/mm	z/mm
ellipse	2 3	- 8.21	914.98	- 9.23
	4 6	- 8.25	914.52	- 9.17
	8 10	- 8.12	917.87	- 9.27
rectangle	2 × 2	- 8.32	913.96	- 9.31
	4 × 4	- 8.38	918.68	- 9.36
	8 × 8	- 8.45	912.36	- 9.48
triangle	2, 2, 2	- 8.27	917.21	- 9.22
	4, 4, 4	- 8.11	919.13	- 9.12
	8, 8, 8	- 8.08	920.72	- 9.05

3 结论

利用双面阵 CCD 摄像头,设计了一种激光光斑空间定位系统。通过数学建模,建立了光斑坐标与 CCD 成像平面坐标、计算机屏幕平面坐标的数学计算公式,由此可以实现激光光斑的空间定位。依据灰度矩法,实现了激光光斑形心的精确定位,定位精度达到 2%,而且能一定程度修正光斑形状变化的影响,具有较好的稳定性。系统可以应用于目标跟踪、物体面形检测等领域。

参考文献

- [1] 冯梦洪,李林,张颖. 面阵 CCD 交汇测量系统布站方式的优化设计 [J]. 光学技术, 2003, 29(1): 34 ~ 36.
- [2] 周锐,房建成,祝世平. 图像测量中光斑尺寸优化及性能分析 [J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(2): 177 ~ 179.
- [3] SONKA M, HLAVAC V, BOYLE R. Image processing, and machine vision [M]. 2nd, USA: Thomson Learning, 1999. 314 ~ 315.

参考文献

- [1] LADANY I. Laser to single-mode fiber coupling in the laboratory [J]. Appl Opt, 1993, 32(18): 3233 ~ 3236.
- [2] CHRISTOPHER A, HERMAN M. Ideal microlens for laser to fiber coupling [J]. J Lightwave Technol, 1993, LT11(2): 252.
- [3] 丁国庆. 高速激光器组件 P-I 曲线曲折问题研究 [J]. 光通信技术, 2003, 27(8): 3 ~ 5.
- [4] DJAFAR K, LOWELL L M. 光纤通信技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002. 369.
- [5] 江剑平. 半导体激光器 [M]. 北京:电子工业出版社, 2002. 343.
- [6] 朱如曾. 激光物理 [M]. 北京:国防工业出版社, 1979. 200 ~ 205.
- [7] 马惠莲,杨建义,李瑾 et al. 光波导单模光纤的直接耦合 [J]. 光通信研究, 2000, 3(99): 43 ~ 47.

(上接第 61 页)

足够的精度,否则将对最佳耦合位置的确定造成很大的困难。

为了能使激光场与光纤场达到更好的匹配,用单一普通的球透镜以及在光纤头形成微透镜是无法实现的。目前发展的一种技术是衍射光学器件,即在普通的透镜表面按一定的规则形成台阶,从而能实现激光场与光纤场的完全匹配,在理论上可以达到 100% 的耦合效率,考虑其它的损耗在内最终也能达到 85% 以上,这将能更好地提高激光器件的有效输出功率。