

材料、结构与工艺

平端光纤与锥端微透镜光纤的耦合研究

赵发英¹, 张全¹, 唐海青²

(1. 浙江大学 光电信息工程系, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州莱姆达光电子技术有限公司, 浙江 杭州 310013)

摘要: 建立了平端光纤与锥端微透镜光纤对耦合的理论模型,得到耦合系数的计算公式。用研磨技术制作了几种不同锥角的光纤,并对它们进行耦合试验,得到最大耦合效率。实验表明实验结果与理论计算结果是一致的。

关键词: 耦合效率; 圆锥透镜光纤; 单模光纤

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 5868(2002)06 - 0429 - 04

Coupling of Butt Fiber and Cone Lensed Fiber

ZHAO Fa-ying¹, ZHANG Quan¹, TANG Hai-qing²

(1. Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, CHN;

2. Hangzhou Lambda Photonics Technology Co., Ltd., Hangzhou 310013, CHN)

Abstract: The coupling between butt fiber and cone lensed fiber is described in this paper. A theoretical model is presented and the formula of coupling efficiency is given. Several types of cone lensed fibers are fabricated by using of lapping machine. In the experiment, the max coupling efficiency was measured. The comparison shows that the theoretical result is in good agreement with the experimental one.

Key words: coupling efficiency; conical lensed fiber; single mode fiber

1 引言

在半导体激光器(LD)和单模光纤(SMF)的耦合技术中,耦合效率和失准容忍度是两个最关键的指标,一个好的设计应同时兼顾这两个方面。由理论分析可知,要得到高的耦合效率就要同时实现LD和SMF的模场匹配和相位匹配。而普通的对接耦合,由于很难同时达到模场匹配和相位匹配,因此耦合效率很低。提高耦合效率的方法有两种,一是在激光器和光纤之间加分立的透镜,二是采用光纤微透镜^[1~4]的方法。其中光纤微透镜法,由于结构紧凑,操作方便,性能稳定可靠,而且耦合效率也非常可观,因此被广泛采用。对于光纤微透镜法,制作微透镜是它的关键。制作光纤微透镜的方法有很多,如拉锥法、化学腐蚀法和研磨法等,其中研磨法是一

种目前采用得较多的方法,只要将光纤的一端磨成所设计的形状,再加上一定的镀膜即可。当然,研磨工艺是一个很精细的过程,需要进行大量的实验和一定的研磨经验。

我们用平端光纤代替激光器,和自己研磨的圆锥光纤进行耦合。首先建立了平端光纤与锥端微透镜光纤对耦合的理论模型,推导出耦合系数的计算表达式。然后采用研磨技术制作了不同锥角和不同顶部球面半径的透镜光纤,并进行耦合实验,在最佳耦合下测量出最大耦合效率。这一方面可以验证理论模型的正确性,同时也可以研究锥角大小和锥顶球面半径大小对耦合效率的影响。从理论和实验上都可以看到,耦合效率不仅与圆锥的锥角有关,而且与圆锥光纤顶部的球面半径有很大的关系。另外,实验和理论计算结果的比较表明,耦合效率的理论值和实验值是吻合的。实测的耦合效率最大值比理论的稍小,主要是由于实验中所用的光纤没有镀减

收稿日期:2002 - 06 - 21.

反膜,这样会带来菲涅尔反射损耗。

2 理论模型

2.1 平顶光纤光束的模场表达式

如图 1 所示,假设从平端光纤端面发出的光是高斯光束,而且它的束腰位置就在光纤端面。假设在 x 和 y 方向上的光斑束腰半径分别是 0_x 、 0_y , 由于光纤端面的对称性,因此有 $0_x = 0_y$ 。那么在光纤端面上的波函数可以写为

$$E_0(x_1, y_1) = \exp\left[-\frac{x_1^2}{2 \cdot 0_x} - \frac{y_1^2}{2 \cdot 0_y}\right] \quad (1)$$

式中, x_1 和 y_1 是平端光纤端面 $X_1 Y_1$ 平面的坐标。

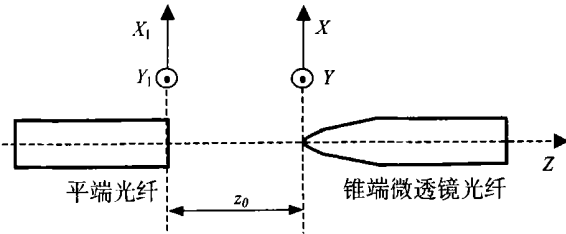


图 1 平端光纤与锥端微透镜光纤的耦合

当光束在自由空间沿 z 轴传播的时候,利用菲涅耳衍射、夫琅和费原理^[5]可以导出光束在传播距离 z_0 后的波函数为

$$E(x, y, z_0) = \exp(ikz_0) \cdot E_0(x_1, y_1) \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2z_0}[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]\right\} \cdot (iz_0)^{-1} \quad (2)$$

是在自由空间传播的波长, k 是波数; x 和 y 是离光纤端面距离为 z_0 的 XY 平面中的坐标。利用式

$$D(x, y) = \begin{cases} nL - (n-1)[R - \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)}], & \sqrt{x^2 + y^2} < R \cos \\ nL - (n-1)\left[\sqrt{x^2 + y^2} \cot - \left[\frac{R}{\sin} - R\right]\right], & \sqrt{x^2 + y^2} > R \cos \end{cases} \quad (5)$$

由于常数因子 $L \cdot n$ 在积分的时候没有贡献,因此式(5)中的常数项可以省略。那么由圆锥透镜所带来的相位因子为

$$t(x, y) = \begin{cases} \exp(ik(n-1)[R - \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)}]), & \sqrt{x^2 + y^2} < R \cos \\ \exp(ik(n-1)[\sqrt{x^2 + y^2} \cot - \left[\frac{R}{\sin} - R\right]]), & \sqrt{x^2 + y^2} > R \cos \end{cases} \quad (6)$$

那么锥端微透镜光纤在平面 XY 内的波函数表达式为

$$E_f(x, y) = \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2f}\right] \cdot t(x, y) \quad (7)$$

通过在 XY 平面上的交叠积分,可以求出耦合效率的表达式:

(3)的结果(其中 a 可以是一个复数,它的实部必须是正数)可将式(2)进行简化为

$$\exp(-ax^2 + ibx + id) dx = \frac{\sqrt{\exp\left[\frac{d^2}{-4a + 4ib}\right]}}{\sqrt{a - ib}} \quad (3)$$

最后可得到平端光纤的光束在传播距离 z_0 后的模场表达式:

$$E(x, y, z_0) = \exp(ikz_0) \cdot \frac{\exp\left[-\frac{0_x \cdot 0_y}{\sqrt{(2z_0 - ik \cdot 0_x)(2z_0 - ik \cdot 0_y)}}\right]}{\exp\left[\frac{2ikz_0 x^2}{4z_0^2 + (k \cdot 0_x)^2} + \frac{2ikz_0 y^2}{4z_0^2 + (k \cdot 0_y)^2}\right]} \cdot \exp\left[-\frac{(k \cdot 0_x)^2}{4z_0^2 + (k \cdot 0_x)^2} - \frac{(k \cdot 0_y)^2}{4z_0^2 + (k \cdot 0_y)^2}\right] \quad (4)$$

2.2 锥端微透镜光纤的波函数及耦合效率

锥端微透镜光纤在理论上可看作平端光纤加上一个微透镜。平端光纤的波函数可由式(1)给出,微透镜则起到一个相位变换的作用^[6],因此,得到了微透镜的相位因子就可得到锥端微透镜光纤的波函数表达式。

用光程差的方法可得到微透镜的相位因子。图 2 为锥端微透镜光纤的截面图,光纤顶部中心处 DOF 是半径为 R 的圆弧,圆弧之外是与圆弧相切的直线,锥角为 2θ 。假设光线是以直线方式传播的,并且光纤芯径内的折射率是 n ,自由空间的折射率是 $n_0 = 1$ 。当光束入射到圆弧 DOF 范围以内时,可由 $b_1 - b_2 - b_3$ 来计算光程,当光线在圆弧之外时,那么由 $e_1 - e_2 - e_3$ 来计算光程,结果如下:

$$\left| \frac{E_1(x, y, z_0) \cdot E_f^*(x, y) dx dy}{|E_1(x, y, z_0)|^2 dx dy \cdot |E_f(x, y)|^2 dx dy} \right|^2 \quad (8)$$

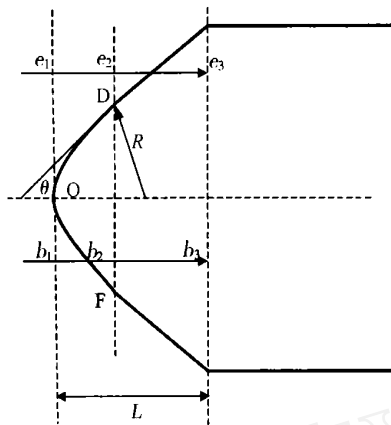


图2 锥端微透镜光纤的截面

果比实验值要稍大,这可能是由于锥端微透镜光纤未镀减反膜,而理论计算中又未考虑光纤表面的反射损失引起的,另外锥角和曲率半径 \$R\$ 的测量不准确也会引入一些计算偏差。



图3 光纤研磨装置

3 实验与讨论

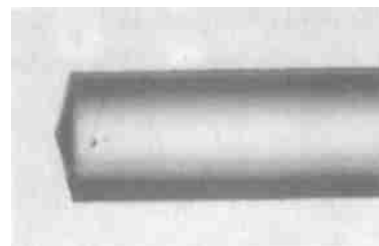
3.1 透镜光纤的制作

用研磨的方法来制作锥端微透镜光纤,所使用的光纤研磨机是美国 ULTRA TEC 公司的 ULTRAPOL 1200 系列研磨机。整个装置如图 3 所示。研磨时,光纤套在光纤夹具中随着电动马达一起旋转,被磨光纤头与研磨盘上的精细磨纸相接触,同时,通过研磨盘的旋转来完成透镜光纤的研磨。采用该方法,可以研磨出不同锥角和半径的微透镜光纤。图 4 是利用该研磨机磨得的两种锥端微透镜光纤。

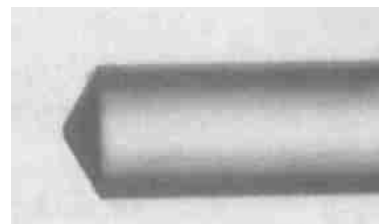
3.2 耦合实验和结果

图 5 示出了耦合实验装置和原理。用平端光纤代替半导体激光器来和研磨好的锥端微透镜光纤进行耦合,所使用的光纤都是 Corning 公司生产的 SMF28 光纤。实验中所用的波长 \$\lambda = 1550\text{ nm}\$,光纤的模场半径是 \$a_x = a_y = f = 5.25\text{ }\mu\text{m}\$。纤芯的折射率是 1.5。实验中,首先用 FC 接头将激光耦合到平端光纤中,用功率计测出它的输出功率 \$P_0\$。然后将平顶光纤固定在五维调整架上,透镜光纤固定在右边的支架上不动,在显微镜的监视下调节五维调整架,使得光功率计的输出最大,将这一最大输出功率与 \$P_0\$ 相比就可计算出最大耦合效率。

实验中,对不同锥角和曲率半径 \$R\$ 的锥端微透镜光纤进行了耦合试验,透镜光纤的锥角和曲率半径 \$R\$ 是通过 CCD 扫描后进行图形处理来得到的。表 1 给出了试验结果和理论值的比较, \$\eta_1\$ 为最大理论耦合效率, \$\eta_2\$ 为实验测得的最大耦合效率。从表中可知理论结果和实验结果是吻合的。理论结

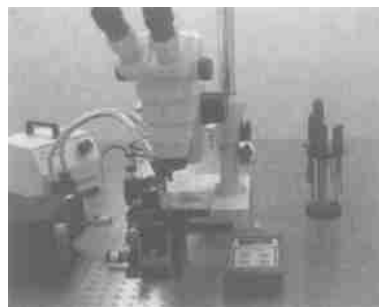


(a) 锥角 142°

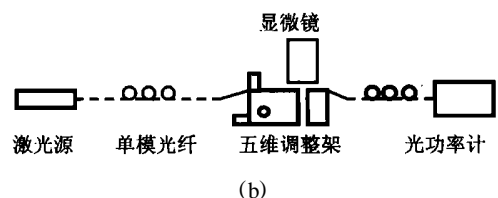


(b) 锥角 110°

图4 用 CCD 扫描显微镜拍摄的圆锥光纤端头(放大倍数为 240 倍)



(a)



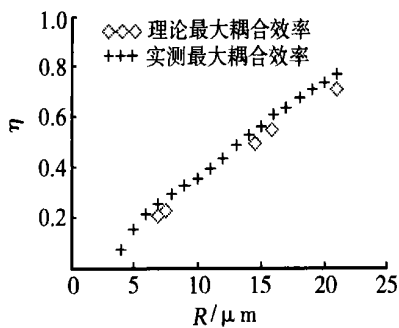
(b)

图5 耦合实验装置(a)和耦合实验原理(b)

表1 不同的微透镜对应的最大理论耦合效率和实测耦合效率

实验组数	$R/\mu\text{m}$	$2/\text{°}$	$1/\%$	$2/\%$
1	18	66	64	61.4
2	12	70	44	38.7
3	7	110	26	21.5
4	7.5	110	28	24
5	7.5	110	28	23.5
6	14.5	110	55	50.2
7	15.8	110	60	55
8	21	110	77	71.3
9	20	145	74	69

由于光能量集中于光纤的纤芯处,所以微透镜的曲率半径 R 对耦合效率有决定性的影响。图6给出了在 $\theta = 55^\circ$ 时,在不同的 R 下的最大耦合效率理论计算值和实验值的比较,可见最大耦合效率随 R 的变化很大,这是值得注意的。

图6 光纤锥角为 110° 时,最大耦合效率与光纤透镜半径的关系

4 结论

文章从理论和实验上对平顶光纤和圆锥光纤的耦合特性进行了讨论和深入的分析。利用研磨技术,制作出不同锥角和透镜半径的圆锥光纤,并对它们进行了耦合实验。实验的结果比理论结果稍小,当考虑到锥端微透镜光纤因没有镀减反膜而带来菲涅耳反射引起的耦合效率损耗和锥角及曲率半径的

测量不准确引入的偏差,理论计算和实验结果是吻合的,说明本文所给出的理论计算是合理的。另外,通过理论和实验可看到,在锥角不变的情况下微透镜半径对耦合效率有很大影响。应当指出的是本文用平端光纤来代替半导体激光器,激光束的束腰半径与实际的半导体激光器会有差异,耦合得到的结果也会不同。所以,当用实际的半导体激光器来进行耦合研究,可以在本文所给出的模型的基础上细致地研究锥角和透镜半径对耦合效率和失准容忍度的影响,从而给出优化的微透镜设计。

参考文献:

- [1] 韦朝,查开德,王新宏. 尖锥端光纤和半导体激光器的耦合[J]. 中国激光, 1998, 25(1): 46 - 50.
- [2] 李宝红,刘雪峰,黄德修. 锥形光纤微透镜耦合特性[J]. 半导体光电, 1996, 17(2): 121 - 125.
- [3] Virendra S S, Lyn C, Richard S V, et al. Efficient power coupling from 980 nm, broad-area laser to a single-mode fiber using a wedging-shaped fiber endface[J]. J. Lightwave Technol., 1990, 8(9): 1313 - 1318.
- [4] Wei Chaojiang, Zha Kaide. The high coupling efficiency for DFB laser-to-fiber[J]. Proc. SPIE, 1996, 2895: 340 - 344.
- [5] Cohen L, Scheider M V. Microlenses for coupling junction lasers to optical fibers[J]. Appl. Opt., 1974, 13(1): 89.
- [6] Kyung S L, Frank S B. Microlense on the end of single-mode optical fibers for laser applications[J]. Appl. Opt., 1985, 24(19): 3134 - 3139.

作者简介:

赵发英(1977 -),女,2000年毕业于浙江大学光电信息工程系,并获学士学位,现为硕士生。主要从事透镜单模光纤和激光器的耦合研究。

E-mail: zhaofaying3338@sina.com

本刊动态

《半导体光电》在北京设立客户服务部

为了更好地促进光电子技术与交流,推动光电子产业的发展,并考虑到北京是我国光电子的技术创新和产业的重要基地,作为光电子领域的权威媒体《半导体光电》已首先在北京设立客户服务部。服务部旨在建立与作者、读者、光电企业、应用单位以及政府相关管理部门的沟通与交流,达成全面合作;收集、处理行业信息,反馈客户意见,全权代理北京地区的广告业务。服务部将立足北京,面向全国,以积极的态度和务实的作风倾听、感受业界的心声,作好服务工作。服务部联系电话:010-84519794。

- 卷终 -