

锥形透镜光纤与平面光波光路芯片的耦合实验*

曲舒霆 刘旭 孙小菡**

(东南大学电子科学和工程学院光子学与光通信研究室, 南京 210096)

摘要 对锥形透镜光纤(TLF)与半导体多量子阱(MQW)平面光波光路(PLC)芯片的耦合特性进行了实验研究. 数值模拟了 TLF、普通单模光纤(SMF)分别和 PLC 芯片脊波导的耦合情形, 发现 TLF-PLC 耦合损耗比 SMF-PLC 耦合损耗小 3.01 dB. 测得了 TLF 的出射光场光斑, 分析了出射光场发散范围. 建立光纤-PLC 芯片耦合实验系统, 用放大自发辐射(ASE)宽带光源在 1550 nm 波长处对比分析了 PLC 芯片与不同光纤的耦合连接损耗, 从而确定最佳方案为 TLF-PLC-SMF: 即 TLF 作为入纤, SMF 作为出纤时, 耦合对准容易实现, 损耗为 10.798 dB, 比 TLF-PLC-TLF 耦合损耗小 4.458 dB.

关键词 锥形透镜光纤; 平面光波光路芯片; 耦合实验

中图分类号 TN256

文献标识码 A

文章编号 1004-4213(2007)01-0047-4

0 引言

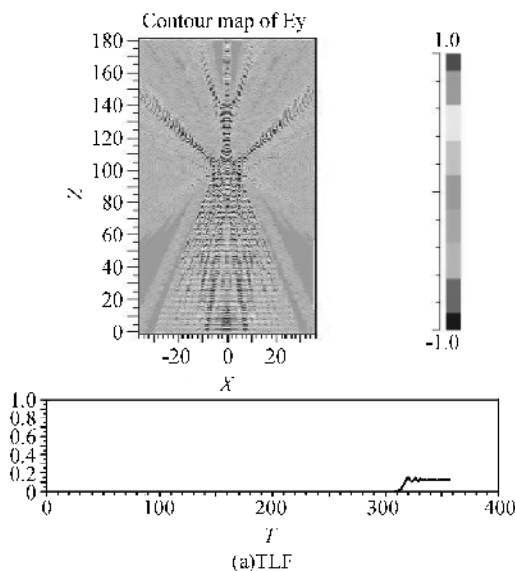
随着平面光波光路技术的发展, 光纤与光器件的耦合对准问题成为了制约各种集成光子器件从实验室走向实用化的瓶颈. 因此, 如何提高光纤与芯片的耦合效率, 降低耦合对准的难度和成本成为问题的焦点. 传统通过普通单模光纤与平面光波光路芯片的波导结构进行耦合的方式存在很大的损耗. 带来这种损耗的主要原因是模斑的失配. 单模光纤的模斑一般为圆型, MFD 为 8~10 μm 左右, 而半导体波导结构的模斑为椭圆形, 尺寸在 1~3 μm 左右. 如何转换模斑尺寸, 降低模斑失配带来的损耗, 提高耦合效率成为了研究的热点.

最近见于报道的模斑转换方式主要有三类: 模斑转换器(SSC)^[1-2]、微透镜^[3]以及特种端面光纤. 模斑转换器具有很好的模斑转换效果, 但目前高性能的片上集成 SSC 需要非常复杂的制造工艺. 而在光纤与芯片之间设置微透镜的方法需要两次对准过程, 实质上增加了耦合的难度. 特种端面光纤通过改变光纤出射端的几何结构达到模斑转换的目的, 结构简单, 效果好. 锥形透镜光纤是特种端面光纤的一种, 具有出射光斑尺寸小和出射光场能量集中的特点^[4-5]. 相对于锥形光纤, 其锥端的微透镜能更好地汇聚出射光束, 还能避免锥形尖端带来的小孔衍射等不利于耦合的效应. 因此, 将锥形透镜光纤用于与芯片耦合, 相对其他方法具有明显的优势^[6-9].

本文通过数值模拟以及不同光纤与 PLC 芯片的耦合实验获得了 TLF 与 PLC 芯片的耦合特性, 确定了光纤与 PLC 芯片的最佳耦合方案.

1 数值分析

在进行实验研究之前, 通过数值模拟了锥形透镜光纤的出射光场以及与平面光波光路芯片的耦合特性. 由于锥形透镜光纤具有轴对称的特点, 因此采用了二维数值模型, 使用 FDTD 方法^[10-11]来模拟 1550 nm 波长的光波传输情形. 采用 Rsoft 公司的 FULLWAVE 软件进行模拟, 同时测量了耦合进入芯片波导的归一化平均功率以反映耦合损耗. 计算结果如图 1. 使用 TLF 的情况下, 测得 PLC 波导中的归一化平均功率为 0.16, 即耦合损耗为 7.96 dB; 使用 SMF 的情况下为 0.08, 耦合损耗为 10.97 dB. 由此可以看出, TLF-PLC 的耦合损耗比 SMF-PLC 减少了 3.01 dB.



*“十五”863 子项目(2002AA31230)和江苏省高技术项目(7706008020)资助

** Tel: 025-83792469 Email: xhsun@seu.edu.cn

收稿日期: 2005-05-09

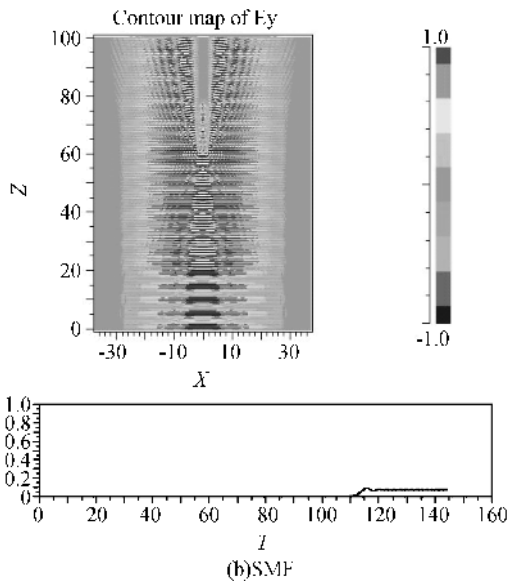


图1 锥形透镜光纤、单模光纤与芯片波导耦合情形数值模拟

Fig. 1 Numeric simulations of the coupling characteristics between waveguide and TLF of SMF

2 锥形透镜光纤出射光场分析

首先通过实验^[12]来研究锥形透镜光纤的出射光场特性. 本实验中, 采用的光纤是一端为锥形透镜端面, 另一端为普通裸纤平端面的锥形透镜光纤. 已知锥形透镜光纤样品的结构参数为: 成锥长度 $Z_c = 300 \mu\text{m}$ 、锥角 $\alpha = 0.733^\circ$ 、透镜曲率半径 $R_L = 13.485 \mu\text{m}$. 考虑实验中肉眼观察的需要, 由激光器发出的单色红光($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)从普通端面耦合入实验光纤, 从锥形端面射出. 在出射端用摄像头拍摄由锥形透镜端面射出的光斑. 经过分析, 即可获得锥形透镜光纤出射光场特性.

锥形透镜光纤出射光场几何光路如图2. 由于锥形透镜光纤的轴对称性, 所以计算出射光场散布范围的大小可以归结为求出射端发散角 α 的大小. 拍摄所得光斑尺寸为感光芯片上得到的像, 首先通过光斑与感光片的尺寸($4.86 \text{ mm} \times 3.64 \text{ mm}$)比例关系得出实际像光斑尺寸. 再由几何光学物象关系得出象距, 进而可得摄像头透镜上光斑大小. 通过物距和透镜上光斑尺寸即可求得 $\alpha/2$ 的正切值, α 角即可求得. 光纤样品测试分析结果如表1.

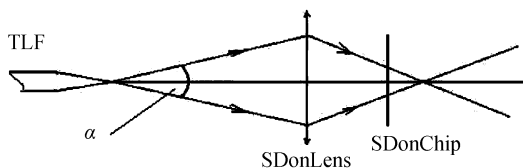


图2 锥形透镜光纤出射光场几何光路
Fig. 2 Analysis model of TLF output field based on geometrical optics

表1 锥形透镜光纤出射光场结果分析

L/cm	1	2	3	4
光斑比例	203/640	142/640	102/640	82/640
实际光斑尺寸/mm	1.5415	1.0783	0.7746	0.6227
象距/mm	15	8.5714	7.5	7.0588
$\text{Tan}(\alpha/2)$	0.1028	0.1258	0.1033	0.0882
$\alpha/^\circ$	11.74	14.34	11.80	10.08

表中 L 表示的是 TLF 出射端与摄像头镜头的距离. 为减少实验误差, 对样品的4次实验结果求得的 α 求平均值为 11.99° . 实验结果的误差主要来自于两个方面: 1) 摄像头透镜厚度较小且无法确知, 因此并未考虑在计算过程中; 2) 摄像头的光轴和待测光纤的出射光轴的对准过程所产生的位移导致摄像头距离光纤出射端的距离有误差.

对实验结果的分析说明, 锥形透镜光纤可以将出射光场限制在一个很小的范围内, 这对于光纤与平面光波光路芯片的耦合是十分重要的特性.

3 锥形透镜光纤与平面光波光路芯片耦合实验

3.1 实验

本实验采用的是半导体多量子阱平面光波光路芯片(MQW-PLCs), 脊波导宽为 $2.5 \mu\text{m}$, 高 $2.36 \mu\text{m}$. 其中MQW层位于脊上, 厚度为 $0.18 \mu\text{m}$. MQW层的折射率为3.464, 其他部分的脊波导折射率为3.398. 测量仪器采用Agilent86142B光谱分析仪.

基本实验装置如图3. 由ASE光源送出光信号, 通过锥形透镜光纤耦合入PLC, 在出射端接收到出射信号后测量其损耗. 微调架可以在三个维度方向进行调节对准, 以达到最佳耦合效果. 最终测得的损耗大小可以直接反映出耦合效率的高低, 而对准过程反映了锥形透镜光纤的耦合难易程度.

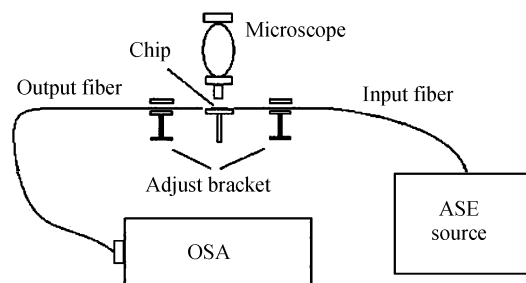


图3 光纤与平面光路芯片耦合实验装置
Fig. 3 Experimental configuration of the coupling between fiber and chip

首先将锥形透镜光纤与单模光纤直接对准, 获得了如图4的出射谱线.

采用单模光纤作为入纤时, 光场能量难以有效耦合入MQW层, 因此不能获得PLC芯片的测试曲

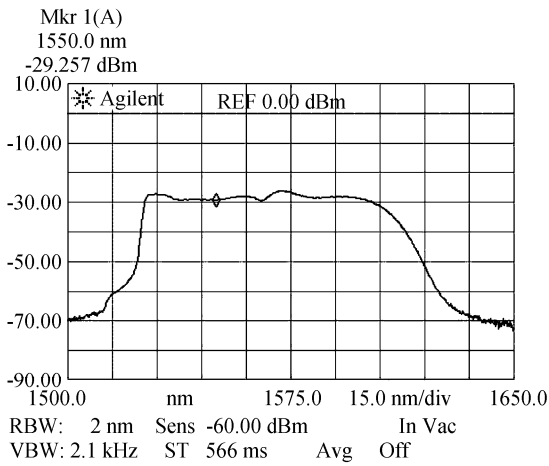


图 4 锥形透镜光纤与单模光纤直接对准出射谱线
Fig. 4 Output spectrum of TLF directly coupled with SMF 线. 这与数值模拟的结果一致.

入纤使用锥形透镜光纤,出纤使用普通端面单模光纤. 由该实验方案,经过适当的调节对准过程即从光谱仪得到了出射光谱曲线,实验实物照片以及出射谱线如图 5.

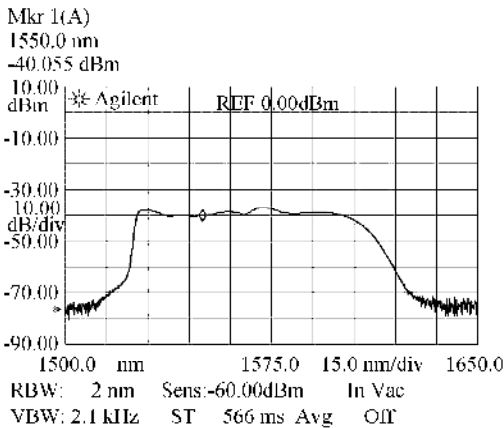
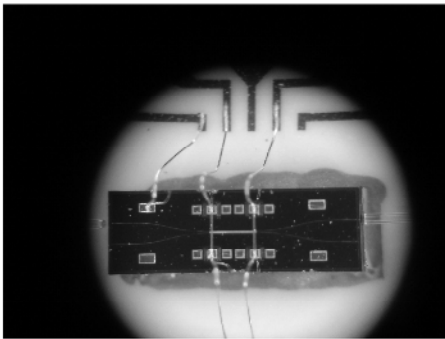


图 5 锥形透镜光纤入纤、普通光纤出纤与器件耦合实验图及出射谱线
Fig. 5 Photo and output spectrum of TLF-chip-SMF linkage

将芯片出纤也换为锥形透镜光纤,对准过程则困难了许多,经过较长时间的对准,由光谱仪测得出射谱线. 实验实物照片及出射谱线如图 6.

3.2 结果分析

实验中,对 1550 nm 波长处的出射功率进行了测量. 图 4 中在锥形透镜光纤与单模光纤直接对准的情

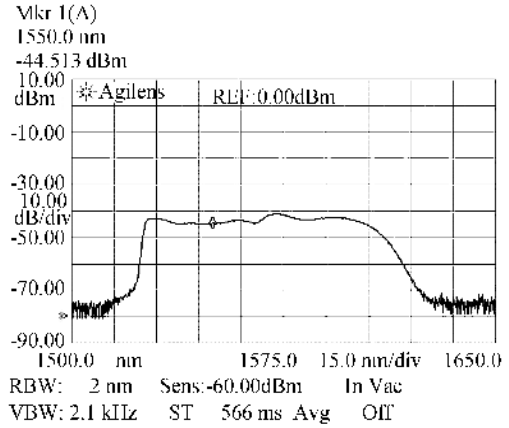
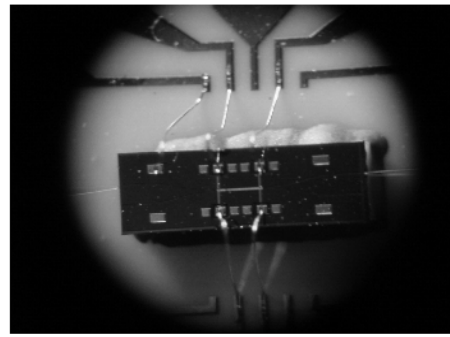


图 6 入纤、出纤均为锥形透镜光纤时与器件耦合实验图及出射谱线

Fig. 6 Photo and output spectrum of TLF-chip-TLF linkage 况下,测得的出射功率为-29.257 dBm. TLF-PLC-SMF 链路出射功率为-40.055 dBm,损耗是 10.798 dB; TLF-PLC-TLF 链路出射功率为-44.513 dB,损耗为 15.256 dB. 可见 TLF-PLC-SMF 耦合损耗比 TLF-PLC-TLF 低 4.458 dB.

从以上的耦合实验中可以看出:第一,锥形透镜光纤的出射光场高度集中在很小的发散区域内,在提高光纤到芯片的耦合效率、降低耦合难度上有着明显的作用. 使用普通单模光纤大部分光信号能量不能耦合进入波导,因此难以得到芯片的测试曲线. 第二,锥形透镜光纤并不适合用于出纤耦合,从图 5 和图 6 的对比中,可以看出采用锥形透镜光纤作为出纤时,出射功率低于采用普通单模光纤作为出纤的情况. 更重要的是,由于锥形透镜的尺寸较小,对准的难度增加,耦合难度较大,因此其耦合效率不如采用普通单模光纤作为出纤的方案. 第三,通过芯片耦合之后,测得的损耗还是比较大的. 这主要来自于锥形透镜光纤圆形模斑与脊波导椭圆形模斑的失配. 锥形透镜光纤的模斑尺寸虽与脊波导相当,但是模斑形状的差异仍然带来损耗. 其次由于实验条件的限制,对准过程实际上只能在纵向、横向以及高低这三个维度内进行,对于角向的失配却无能为力,而且通过显微镜无法直接观察到垂直高度一维的光纤-芯片对准情况. 此外,光纤与芯片的对准装

置对于力学振动比较敏感. 空气的流动和噪音都能对实验结果造成干扰.

4 结论

通过数值仿真的结果以及一系列实验证明: 锥形透镜光纤作为一种特种透镜光纤, 在光纤与平面光波光路芯片的耦合上能够大大降低耦合损耗, 同时使得耦合对准的过程得以简化, 方便耦合. 实验分析比较说明, 锥形透镜光纤作为芯片的入纤, 普通端面单模光纤作为出纤的方案是最佳的选择. 锥形透镜光纤虽然可以压缩单模光纤的模斑尺寸, 但是由于其传输的仍为圆高斯光束, 只限于特定场合的使用.

参考文献

- [1] STULEMEIJER J, BAKKER A F, MOERMAN I, *et al.* Inp-based spotsizer converter for integration with switching devices [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(1): 81-83.
- [2] DONG Hong-zhou, SHI Shun-xiang, LI Jia-li. A novel optical mode converter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1677-1680.
董洪舟, 石顺祥, 李家立. 一种新型光学模式转换器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1677-1680.
- [3] YOSHINO K, TAKESHITA T, KOTAKA I, *et al.* Compact and stable electro-absorption optical modulator modules[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(9): 1700-1707.
- [4] LOVE J D, HENRY W M, STEWART W J, *et al.* Tapered single-mode fibers and devices-Part 1: Adiabaticity criteria[J]. *Proc Inst Elect Eng*, 1991, **138**(5): 343-354.
- [5] SUN Ai-juan, TIAN Wei-jian, QU You-shan, *et al.* Simulation of light propagation in fiber optic taper by monte carlo method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 552-554.
孙爱娟, 田维坚, 屈有山, 等. 锥形光纤中光波传输特性的蒙特卡罗模拟[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4): 552-554.
- [6] LATRY O, KETATA M, KETATA K, *et al.* Optimization of the coupling between a tapered fiber and a P-I-N photodiode [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1995, **28**(8): 1562-1572.
- [7] LOVE J D, HENRY W M, STEWART W J, *et al.* Tapered single-mode fibers and devices-part II: experimental and theoretical quantification[J]. *Proc Inst Elect Eng*, 1991, **138**(5): 355-364.
- [8] FIELDING A J, EDINGER K, DAVIS C C. Experimental observation of mode evolution in single-mode tapered optical fibers[J]. *Journal of Light wave Technology*, 1999, **17**(9): 1649-1656.
- [9] GUTTMAN J L, CHIRITA R, PALSAN C D. Mode-field diameter and "spot size" measurements of lensed and tapered specialty fibers[C]. *Symp. Opt. Fiber Meas., Natl. Inst. of Standards and Technol., Boulder, CO*, 2002: 33-36.
- [10] GE De-biao, YAN Yu-bo. Electromagnetic wave FDTD method[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. 126-168.
葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 146-168.
- [11] SHENTU Wei-jin, CAI Chun, DAI Jin-cao, *et al.* Boundary condition and initial condition in the time-domain beam propagation methods applied to study planar waveguides [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 537-541.
申屠伟进, 蔡纯, 戴劲草, 等. 平面光波器件时域有限差分束传输法分析中边界和初始条件的处理[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 537-541.
- [12] LIU Xu, CHEN Lin, CAI Chun, *et al.* Investigation on focusing performance of tapered and lensed fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **26**(8): 1182-1186.
刘旭, 陈麟, 蔡纯, 等. 锥形透镜光纤聚焦特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1182-1186.

Experimental Observation on the Coupling Characteristics of Tapered and Lensed Fiber and Planar Lightwave Circuit Chip

QU Shu-ting, LIU Xu, SUN Xiao-han

(Laboratory of Photonics and Optical Communication, Southeast University, Nanjing 210096)

Received date: 2006-05-09

Abstract The coupling characteristics of tapered and lensed fiber (TLF) and semiconductor MQW planar lightwave circuit (PLC) chip was investigated experimentally. Based on FDTD method, the optical mode field transmission from TLF or SMF to PLC chip was simulated. The coupling loss of TLF-PLC was 3.01 dB less than that of SMF-PLC. The TLF output spot was shot and consequently the divergence angle was calculated on geometrical optics. Different coupling experimental configurations for fiber-PLC chip alignment and connection were demonstrated using ASE broadband source. At 1550 nm wavelength, the coupling loss for TLF-PLC-SMF linkage was 10.798 dB. It was 4.458 dB less than TLF-PLC-TLF and moreover the former method was more easily implemented than the latter one so that the optimum coupling scheme was established.

Key words Tapered and lensed fiber (TLF); Planar lightwave circuit (PLC); Coupling experiment



QU Shu-ting was born in 1980. He received his B. S. degree in Electronic Engineering Department of Southeast University. Now he is pursuing his M. S. Degree in Photonics and Optical Communication Laboratory of Southeast University. His research interest mainly concentrates on the techniques of passive optical integrated chips.