

文章编号: 0253-2239(2007)04-0680-5

楔形光纤与半导体多量子阱平面光波光路芯片的 耦合分析*

刘 旭 肖金标 孙小菡

(东南大学电子科学与工程学院, 南京 210096)

摘要: 采用楔形光纤(WSF)实现了与半导体多量子阱(MQW)平面光波光路(PLC)芯片的高效耦合。在多量子阱-平面光波光路前置模斑转换器(SSC)和不加模斑转换器的情况下,用阶梯串联法(SCM)数值模拟并优化设计了楔形光纤-平面光波光路间最佳耦合参量:楔形光纤楔角 45° 、端面圆柱透镜曲率半径 $2.5 \mu\text{m}$ 、模斑转换器-多量子阱-平面光波光路出射椭圆光斑长半轴 $3.5 \mu\text{m}$ 、纵横比 5、楔形光纤-平面光波光路间垂直方向和水平方向无偏移、纵向间距 $5.5 \mu\text{m}$ 。用反向推演法(IDM)实验分析了楔形光纤样品的出射光场,与阶梯串联法(SCM)计算结果相比长轴误差为 3.125%,短轴误差为 0.8%。建立楔形光纤-平面光波光路-单模光纤(SMF)的耦合实验系统,在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处以单模光纤作为出纤的相同条件下,发现楔形光纤激励入射平面光波光路比单模光纤和锥形透镜光纤(TLF)作为入纤的耦合效率分别提高了 24.827 dB 和 16.22 dB,为多量子阱-平面光波光路芯片尾纤封装技术提供了实验原型。

关键词: 集成光学; 多量子阱; 平面光波光路; 耦合封装; 楔形光纤; 阶梯串联法

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Alignment and Coupling between Planar Lightwave Circuit Chip and Wedge-Shaped Fiber

Liu Xu Xiao Jinbiao Sun Xiaohan

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: An approach to alignment and coupling between wedge-shaped fiber (WSF) and semiconductor multiple quantum well planar lightwave circuit (PLC) chip integrated with two-dimensional spot size converter (SSC) was presented. Using staircase concatenation method (SCM), the optimum coupling conditions were achieved for wedge-shaped fiber wedge angle, cylindrical endface lens curvature radius, semimajor axis of planar lightwave circuit elliptical field, aspect ratio of planar lightwave circuit elliptical field, misalignment tolerance between wedge-shaped fiber and planar lightwave circuit to be 45° , $2.5 \mu\text{m}$, $3.5 \mu\text{m}$, 5, $5.5 \mu\text{m}$ respectively. The output spot of wedge-shaped fiber was experimentally characterized by inverse deducing method (IDM). Compared with the staircase concatenation method computation, the error for the semimajor axis was 3.125%, while that for the semiminor axis was 0.8%. $1.55 \mu\text{m}$ signal laser was injected into planar lightwave circuit from SMF, tapered and lensed fiber (TLF), wedge-shaped fiber separately as planar lightwave circuit input fiber with the same SMF as output fiber. The coupling efficiency for wedge-shaped fiber was 24.827 dB and 16.22, dB higher than that of SMF and TLF, and therefore an experimental prototype of wedge-shaped fiber-planar lightwave circuit-SMF coupling linkage was established for pigtailed planar lightwave circuit packaging technique.

Key words: integrated optics; multiple quantum well; planar lightwave circuit; coupling and packaging; wedge-shaped fiber; staircase concatenation method

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

作者简介: 刘 旭(1972-),男,河南郑州人,讲师,博士研究生,主要从事光子学和光通信技术方面的研究。

E-mail: liuare@seu.edu.cn

导师简介: 孙小菡(1955-),女,安徽黄山人,教授,博士生导师,主要从事光子学和光通信技术方面的研究。

E-mail: xhsun@seu.edu.cn

收稿日期: 2006-05-09; 收到修改稿日期: 2006-10-25

1 引 言

随着平面光波光路(PLC)芯片技术的逐渐走向成熟,封装技术必然得到充分重视,对平面光波光路芯片与光纤对准耦合的要求也越来越高^[1~3]。但芯片与光纤之间的耦合损耗是长期以来没有得到很好解决的一项技术难题。

InP 基和 GaAs 基多量子阱-平面光波光路广泛应用于各类光无源器件,其优点是可以与半导体激光器、探测器等有源器件实现混合集成或单片集成等^[3~6]。由于量子阱的限制效应,其端面的光场为椭圆模斑,标准单模光纤的圆光斑模场直径(MFD)为 8~10 μm ,它们之间存在着模场失配;而且 III-V 族材料相对于石英和聚合物等其它平面光波光路常用材料与光纤之间的折射率失配更大,在平面光波光路和光纤的界面有严重的反射损耗^[7]。这两方面都给光纤与平面光波光路的对准耦合带来了困难。

将椭圆光场有效地耦合进光纤有许多方法。使用不同工艺制作三维光束模斑变换器件可以改善平面光波光路与单模光纤之间的耦合,且有较大的径向和角向容差,但制作技术难度大、成本高^[5~10]。使用特殊端面透镜光纤^[11~14]也可提高耦合效率,特殊透镜光纤虽具有加工制作简单、灵活方便、易于集成封装等优点,但其径向和角向容差较小。锥形透镜光纤(TLF)^[12]对单模光纤的高斯光束实现了会聚,将模场直径压缩为 4~5 μm ,相对于单模光纤提高了与平面光波光路的耦合效率,但圆形光斑和平面光波光路的椭圆模斑仍存在着部分失配,而且其尖锥形端部在与芯片的对准调节过程中容易损伤平面光波光路波导端面^[7]。楔型光纤(WSF)^[13,14]是将标准单模光纤用光学研磨的方法加工成一定角度的楔形,再将端面制成微小尺寸柱面透镜获得的。它可以输出椭圆光斑,改善聚光效果,将光场高效耦合入平面光波光路芯片的多量子阱层,最大限度地防止光场进入多量子阱层以外波导层或衬底层。目前,楔形光纤主要用来实现与有源光器件的高效耦合,尚未见楔形光纤应用于多量子阱-平面光波光路芯片的耦合报道。

本文采用楔形光纤实现了与半导体多量子阱-平面光波光路芯片的高效耦合。首先利用阶梯串联法(SCM)^[15]分析多量子阱-平面光波光路芯片、楔形光纤的出射光场及其耦合损耗,确定了楔形光纤的最优结构参量、讨论了楔形光纤与平面光波光路的位置失配关系。接着实验分析楔形光纤的出射光

场,最后以单模光纤、锥形透镜光纤、楔形光纤作为入纤,以单模光纤作为出纤对平面光波光路定向耦合器芯片直通态进行实测对比。

2 模型和优化

2.1 模型

楔形光纤与平面光波光路芯片耦合方案见图 1。图中结构参量 θ 、 R 、 a 为楔形光纤的楔角、端面圆柱透镜曲率半径和单模光纤纤芯半径, D 为光纤-平面光波光路间纵向失配。

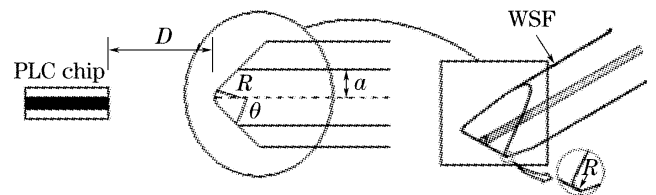


图 1 楔形光纤与平面光波光路芯片耦合基本结构

Fig. 1 Schematic illustration for coupling between wedge-shaped fiber and planar lightwave circuit chip

2.2 阶梯串联法分析

多量子阱采用 InP/InGaAsP 材料,工作于 1.55 μm 波长,其出射场为典型的椭圆模场,形状和尺寸随多量子阱脊宽变化。图 2(a)、图 2(b)、图 3 分别表示了用阶梯串联法算出的直接输出多量子阱-平面光波光路(脊宽 2.5 μm)、模斑转换器-多量子阱-平面光波光路(脊宽 8 μm)、楔形光纤(楔角 45°)出射光场分布。

可见对于直接端面多量子阱-平面光波光路椭

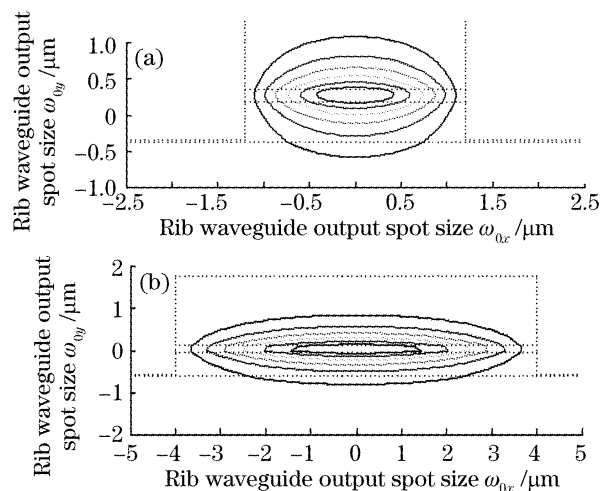


图 2 数值模拟(a)直接端面多量子阱和(b)模斑转换器-多量子阱-平面光波光路输出场

Fig. 2 (a) Multiple quantum well and (b) spot size converter-multiple quantum well planar lightwave circuit output optical field simulated by staircase concatenation method

圆光斑长半轴 $\omega_{0x} = 1.2 \mu\text{m}$, 短半轴 $\omega_{0y} = 0.8 \mu\text{m}$ 。对于模斑转换器-多量子阱-平面光波光路有 $\omega_{0x} = 3.7 \mu\text{m}$, $\omega_{0y} = 0.7 \mu\text{m}$ 。楔形光纤出射场 $\omega_{0x} = 3.2 \mu\text{m}$, $\omega_{0y} = 1.25 \mu\text{m}$ 。

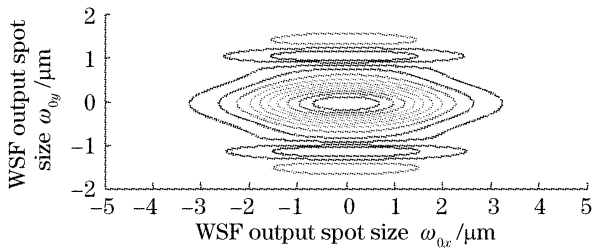


图 3 数值模拟楔形光纤出射端光场分布

Fig. 3 Wedge-shaped fiber output optical field simulated by staircase concatenation method

2.3 设计

2.3.1 固定间距 D , 对 θ 、 R 、 n_{ar} 的优化设计

平面光波光路出射椭圆光场的长轴和短轴长度之比称为纵横比 (Aspect ratio, AR)。当纵横比 n_{ar} 、楔形光纤的楔角 θ 和端面曲率半径 R 变化时, 耦合损耗存在很大差异。本节用阶梯串联法计算楔形光纤与模斑转换器-多量子阱-平面光波光路的耦合损耗, 确定楔形光纤的最优结构参量和平面光波光路纵横比。多量子阱-平面光波光路的 ω_{0x} 取为 $1.25 \mu\text{m}$, 模斑转换器-多量子阱-平面光波光路的 ω_{0x} 取为 $3.5 \mu\text{m}$, 楔形光纤的结构参量见表 1。假设光纤与平面光波光路芯片对中, 纵向间距 D 固定。由于 θ 、 R 、 n_{ar} 等参量都可以变化, 计算中采用控制变量法以获得各变量的最佳值。

表 1 楔形光纤结构参量

Table 1 Structural parameters for wedge-shaped fiber

Radius $a / \mu\text{m}$	Index difference Δ	Refractive index n	Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$
4.15	0.0053	1.4692	1.55

当固定 $D = 5.5 \mu\text{m}$ 、 $n_{ar} = 5$ 、 $\theta = 45^\circ$ 时, 楔形光纤与模斑转换器-多量子阱-平面光波光路的耦合损耗随 R 的变化如图 4(a) 所示。从图中可见, 当圆柱曲率半径 $R = 2.5 \mu\text{m}$ 时损耗达到最小。当曲率半径从 $2.5 \mu\text{m}$ 变大时, 耦合损耗迅速增大。

当固定 $D = 5.5 \mu\text{m}$ 、 $R = 2.5 \mu\text{m}$ 、 n_{ar} 分别取 3、4、5 时, 楔形光纤与模斑转换器-多量子阱-平面光波光路的耦合损耗随 θ 变化如图 4(b) 所示。从图中可见, 当 $n_{ar} = 5$ 时, 耦合损耗在 $\theta = 45^\circ$ 达到极小值。观察图还可发现, 当 θ 从 20° 变到 30° 时, $n_{ar} = 3$ 和 $n_{ar} = 4$ 的耦合损耗基本一致, $n_{ar} = 5$ 的耦合损耗较大; 当 θ 从 30° 变到 50° 时, $n_{ar} = 4$ 和 $n_{ar} = 5$ 的耦合损耗基本一致, $n_{ar} = 3$ 的耦合损耗较大; 当 θ 从 50° 变到 70° 时, $n_{ar} = 5$ 的耦合损耗增长最快, $n_{ar} = 3$ 的耦合损耗增长最慢。从图中还看不出 n_{ar} 的变化规律。

当固定 $D = 5.5 \mu\text{m}$ 、 $R = 2.5 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 45^\circ$ 时, 楔形光纤与模斑转换器-多量子阱-平面光波光路的耦合损耗随 n_{ar} 变化如图 4(c) 所示。从图中可见, 当 $n_{ar} = 5$ 时, 耦合损耗达到极小值。观察图还可发现, 当 n_{ar} 从 1 变到 5 时, 耦合损耗急剧减小; 而当 n_{ar} 从 5 开始变大时, 耦合损耗只是缓慢增加。

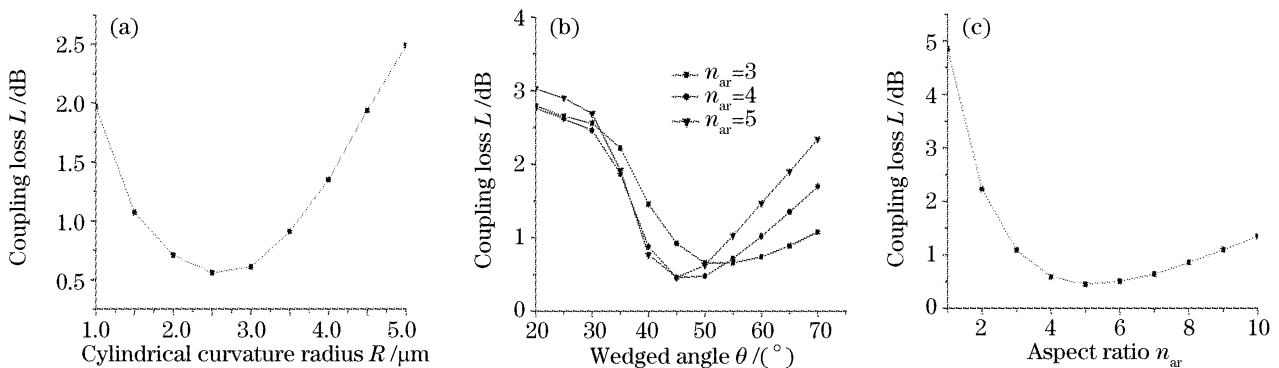


图 4 固定间距 D , 耦合损耗随 (a) R 、(b) θ 、(c) n_{ar} 的变化

Fig. 4 Coupling loss varying with (a) R , (b) θ , (c) n_{ar} for stationary axial displacement D

2.3.2 楔形光纤-平面光波光路位置失配

在耦合实验系统中, 光纤和平面光波光路的对准往往存在着错位和失配。这些失配包括: 垂直失配 D_y (平行于 y 轴)、水平失配 D_x (平行于 x 轴) 以及纵向失配 D_z (平行于 z 轴传播方向)。当 $R = 2.5 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $n_{ar} = 5$ 时, 楔形光纤与模斑转换器

-多量子阱-平面光波光路、多量子阱-平面光波光路的耦合损耗和位置失配的关系示于图 5。

从图 5 中可见, 对多量子阱-平面光波光路来说, 当 $D = 5 \mu\text{m}$ 时, 耦合损耗达到极小值; 对模斑转换器-多量子阱-平面光波光路来说, 当 D 在 $5 \sim 6 \mu\text{m}$ 范围内时, 耦合损耗较小。垂直方向和水平方

向无偏移时,耦合损耗最小;且垂直方向失配容差明显小于水平方向。这些数据为光纤微调架的精密调节以实现楔形光纤与平面光波光路芯片的无源对准

提供了依据。从图 5 中还可见使用模斑转换器后,楔形光纤与平面光波光路的耦合损耗明显降低。

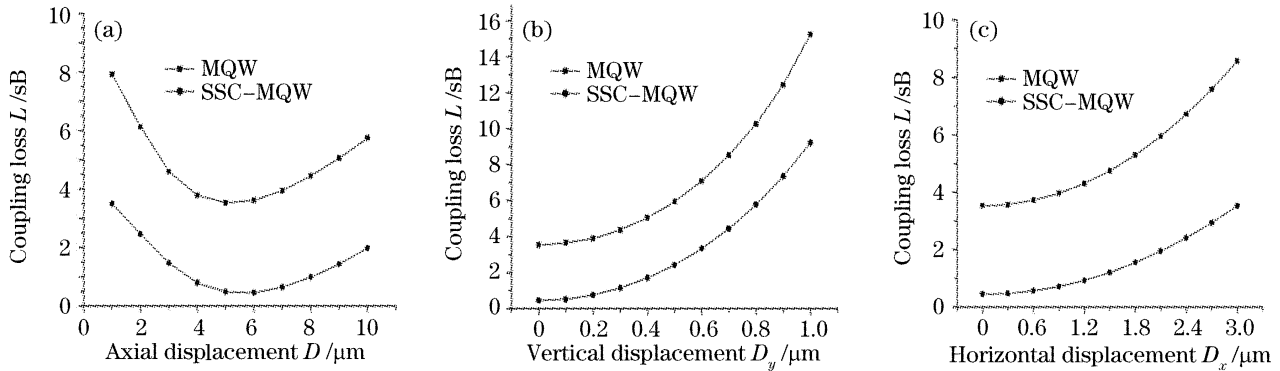


图 5 楔形光纤与多量子阱-模斑转换器-多量子阱的失配关系。(a)纵向失配, (b)垂直失配, (c)水平失配

Fig. 5 (a) Axial, (b) vertical, (c) horizontal displacement between wedge-shaped fiber and multiple quantum well, spot size converter-multiple quantum well

3 实 验

3.1 楔形光纤出射光场测试分析

利用建立在高斯光束物像转换关系之上的 IDM 方法^[12],可以算出楔形光纤出射光斑尺寸。图 6 为楔形光纤出射光场经摄像机成像、显示在计算机上的光斑位图,可知像方椭圆高斯光束在 CMOS 芯片上的实际光斑尺寸为 $2.5175mm \times 1.8025mm$,解得

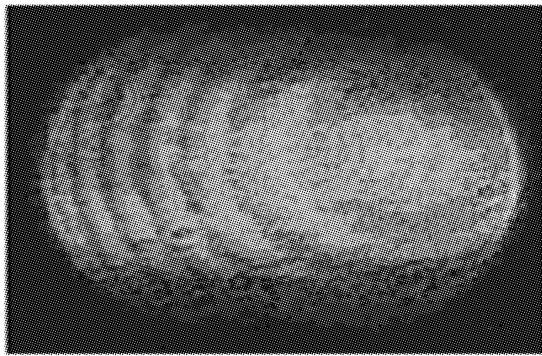


图 6 楔形光纤出射光场经摄像机采集的计算机位图
Fig. 6 Camera acquisition bitmap for wedge-shaped fiber output optical field

楔形光纤(楔角 45°)出射场椭圆光斑($2\omega_{0x} \times 2\omega_{0y}$)为 $6.2 \mu m \times 2.48 \mu m$,与图 3 的阶梯串联法计算结果 $6.4 \mu m \times 2.5 \mu m$ 相比长轴误差为 3.125% ,短轴误差为 0.8% 。

3.2 楔形光纤-平面光波光路-单模光纤耦合实验

以单模光纤作为芯片出纤,以单模光纤、锥形透镜光纤、楔形光纤作为芯片入纤进行光纤和平面光波光路芯片的对准耦合实验。图 7 为研制的基于 InP/InGaAsP 模斑转换器-多量子阱-平面光波光路定向耦合器芯片与光纤耦合的实验装置,对准耦合方案为楔角 45° 的楔形光纤[图 7(a)]距平面光波光路芯片[图 7(b)] $5.5 \mu m$ 激励入射上波导左端口、单模光纤[图 7(c)]在上波导右端口接收,对直通态进行不加电测试。测试仪器为 Agilent 86142B 光谱分析仪(OSA),光谱分析仪内置 EELED 在 $1.55 \mu m$ 波长处的输出功率为 $-25 dBm$ 。图 8 为在单模光纤作为出纤的相同条件下,分别用单模光纤、锥形透镜光纤和楔形光纤激励入射波导测得的光谱曲线,在 $1.55 \mu m$ 波长处的接收功率为

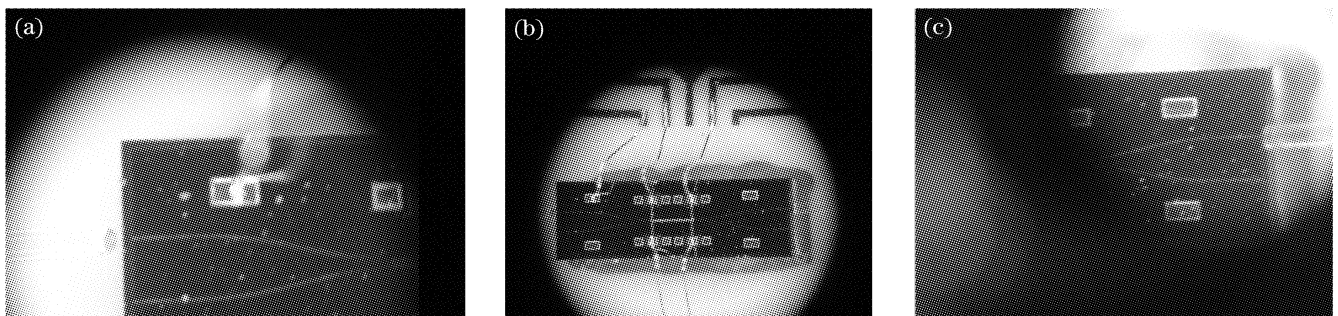


图 7 楔形光纤-平面光波光路-单模光纤实验照片。(a)楔形光纤入纤, (b)对准耦合, (c)单模光纤出纤

Fig. 7 Wedge-shaped fiber-planar lightwave circuit-SMF experimental photograph. (a) Input fiber, wedge-shaped fiber, (b) alignment and coupling, (c) output fiber, SMF

-70.442 dBm、-61.835 dBm 和 -45.615 dBm, 所以损耗分别为 45.442 dB、36.835 dB 和 20.615 dB。可见楔形光纤激励入射平面光波光路芯片比单模光

纤和锥形透镜光纤分别作为入纤的耦合效率提高了 24.827 dB 和 16.22 dB。

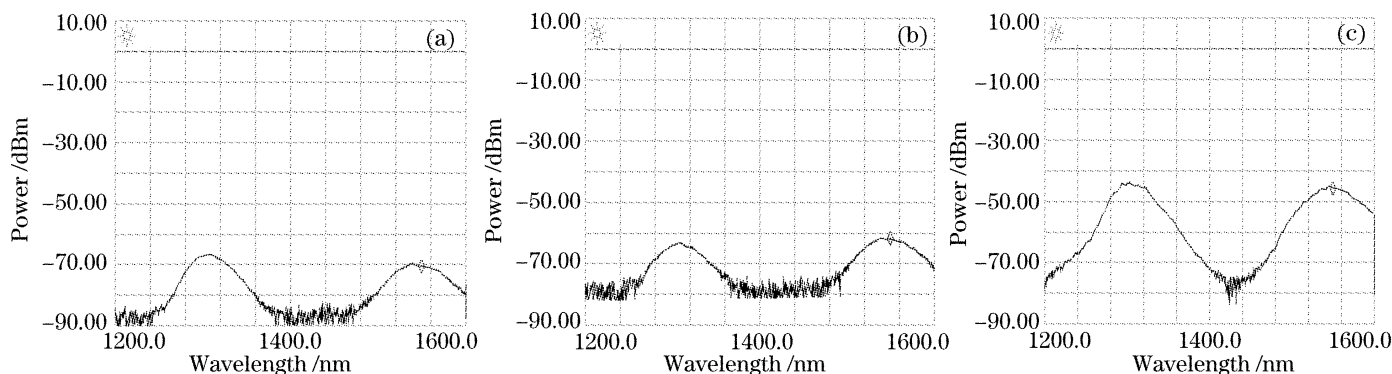


图 8 (a)单模光纤,(b)锥形透镜光纤,(c)楔形光纤激励入射波导测试曲线

Fig. 8 Planar lightwave circuit chip bar port test result for different inputs. (a) SMF, (b) tapered and lensed fiber, (c) wedge-shaped fiber

4 结 论

本文提出楔形光纤和基于二维模斑转换器的多量子阱-平面光波光路芯片因为具有相似的模场形状和尺寸,在它们之间可以实现光场的高效耦合。用阶梯串联法方法数值模拟了多量子阱、模斑转换器-多量子阱、楔形光纤的出射光场,通过对模斑转换器-多量子阱和多量子阱与楔形光纤的耦合计算,得到了最佳的耦合参量:用 G-652 光纤研磨的楔形光纤当楔角 45° 、端面圆柱透镜曲率半径 $2.5 \mu\text{m}$ 、纵向间距 $5.5 \mu\text{m}$ 时,与模斑转换器-多量子阱-平面光波光路芯片(出射椭圆光斑长半轴 $3.5 \mu\text{m}$,纵横比为 5)的耦合损耗最低。基于反向推演方法对楔形光纤出射光场作了测试分析,与阶梯串联法数值结果相比误差小于 3.2%。以单模光纤作为出纤,分别以单模光纤、锥形透镜光纤、楔形光纤作为入纤对平面光波光路定向耦合器直通态进行实测对比,发现楔形光纤激励入射平面光波光路芯片比单模光纤和锥形透镜光纤的耦合效率提高了 24.827 dB 和 16.22 dB,从而确证了楔形光纤-平面光波光路-单模光纤的最佳对准耦合方案,为平面光波光路芯片尾纤封装技术提供了实验原型。

参 考 文 献

- 1 D. A. Schleuning, R. Dato, G. Frangineas *et al.*. Packaging multiple active and passive elements in a hybrid optical platform [J]. *J. Lightwave Technology*, 2004, **22**(5): 1320~1326
- 2 Long Caihua, Chen Baoxue, Sha Huijun *et al.*. Study on fiber-waveguide automatic alignment system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 442~447 (in Chinese)
龙彩华,陈抱雪,沙慧军等.光波导-光纤自动调芯系统研究[J].*光学学报*, 2004, **24**(4): 442~447
- 3 G. Wenger, M. Schienle, J. Bellermaun *et al.*. Self-aligned packaging of an 8×8 InGaAsP-InP space switch[J]. *J. Sel.*

- Topics in Quant. Electron.*, 1997, **3**(6): 1445~1456
- 4 Deok Ho Yeo, Kyung H. Integration of waveguide-type wavelength demultiplexing photodetectors by the selective intermixing of InGaAs/InGaAsP quantum-well structure [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(6): 824~829
- 5 Lianping Hou, Wei Wang, Hongliang Zhu. Novel electroabsorption modulator monolithically integrated with spot-size converter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **3**(1): 49~52
- 6 Ma Hong, Yi Xinjian, Chen Sihai. Monolithic integration of spot-size converters with $1.3 \mu\text{m}$ polarization-insensitive semiconductor optical amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 756~758 (in Chinese)
马宏,易新建,陈四海. $1.3 \mu\text{m}$ 偏振无关半导体光放大器单片集成模斑变换器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 756~758
- 7 Chih-Hsiao Chen, Stephen C. Shunk, Uziel Koren *et al.*. Semiconductor optical amplifier array coupled to uncoated flat-end fibers with integrated beam expanders and TiO_2 antireflection coatings[J]. *J. Sel. Topics in Quant. Electron.*, 1997, **3**(6): 1421~1428
- 8 T. Brenner, M. Bachmann, H. Melchior. Vertically tapered InGaAsP/InP waveguides for highly efficient coupling to flat-end single-mode fibers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(7): 798~800
- 9 Gundolf Wegner, Lothar Stoll, Bernhard Weiss *et al.*. Design and fabrication of monolithic optical spot size transformers (MOST's) for highly efficient fiber-chip coupling [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(10): 1782~1790
- 10 T. Mizuno, T. Kitoh, M. Itoh *et al.*. Optical spotsize converter using narrow laterally tapered waveguide for planar lightwave circuits[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(3): 833~839
- 11 R. A. Modavis, T. W. Webb. Anamorphic microlens for laser diode to single-mode fiber coupling[J]. *Photonic Technol. Lett.*, 1995, **7**(7): 798~800
- 12 Liu Xu, Chen Lin, Cai Chun *et al.*. Investigation on focusing performance of tapered and lensed fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1182~1186 (in Chinese)
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
- 13 Kong Xiaojian, Huang Dexiu, Liu Deming *et al.*. A $1.3 \mu\text{m}$ SOA module coupled with two wedged cylindrical fiber lenses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1201~1203 (in Chinese)
孔小健,黄德修,刘德明等.用楔形柱面光纤微透镜耦合的 $1.3 \mu\text{m}$ SOA 组件[J].*光子学报*, 2003, **32**(10): 1201~1203
- 14 Szu-Ming Yeh, Sun-Yuan Huang, Wood-Hi Cheng. A new scheme of conical-wedge-shaped fiber endface for coupling between high-power laser diodes and single-mode fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4): 1781~1786
- 15 Katsunari Okamoto. *Fundamentals of Optical Waveguides* [M]. San Diego: Academic Press, 2000. 323~339