

## 渐变折射率平板波导耦合器研究 \*

孔小健,黄德修,刘德明,王 涛

(华中科技大学 光电子工程系,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**介绍了渐变折射率平板波导耦合器的结构特点,并用波导理论详细分析了其工作机理及制作方法,给出了相应的设计方程。尤其是针对半导体光放大器与单模光纤耦合的问题,介绍了渐变折射率平板波导耦合器在光通信系统中的实际应用,由于渐变折射率平板波导耦合器可以选择性地对半导体光放大器的输出模斑进行有效变换并压缩光束的束散角,因此实现了半导体光放大器到单模光纤的高效率光耦合,其光耦合损耗约为 3 dB,可基本满足工程使用要求。从光学特性上,渐变折射率平板波导耦合器可以在许多领域替代柱面镜。

**关键词:**半导体光放大器; 平板波导; 光纤耦合; 模斑变换

**中图分类号:** TN929. 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)02-0204-05

## Research on gradient-index strip waveguide coupler \*

KONG Xiao-jian, HUANG De-xiu, LIU De-ming, Wang Tao

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The gradient-index strip waveguide coupler is introduced in this paper. Its principle and configuration were analyzed carefully and design equations were set up. Because a SOA's mode-dimension and emission-angle could be converted with a selected direction by a gradient-index strip waveguide coupler, a high-efficient fiber-chip coupling application was realized, and the minimum coupling loss was less than 3 dB. The graded index strip waveguide coupler could be used to replace a cylindrical lens sometimes due to their equivalent optical properties.

**Key words:** SOA; Strip waveguide; Fiber coupling; Mode-expansion

### 0 引 言

半导体光放大器(SOA)应用的日益广泛,引起了人们的极大关注。经过多年的努力与实践,许多关键技术得到有效的突破与解决,其性能大幅度提高,有

望在飞速发展的光通信网络技术中发挥重要的作用。由于 SOA 有许多独特的优点,在波长转换方面的应用前景以及量子阱材料的发展,自 20 世纪 90 年代以来倍受青睐。SOA 成本低、体积小、质量轻、便于集成、增益平坦性较好。高增益和低偏振灵敏度是 SOA 的两个最主要的技术指标。目前,SOA 在通信

收稿日期:2003-06-03; 修订日期:2003-08-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69977011)

作者简介:孔小健(1963-),男,山东济宁人,副教授,博士生,主要从事光纤通信与光放大技术研究。

网络中的低接入损耗是多年来未得到解决的一个技术难题,这直接影响到 SOA 的高增益特性,以及市场化应用。通常 SOA 的模斑尺寸很小,远场输出为椭圆形光斑,在垂直于结平面方向有较大的光束发散角,很难与单模光纤的模场相匹配,单模光纤的模斑尺寸为圆对称分布,数值孔径角也很小,因而,当用光纤与 SOA 耦合时将呈现较大的耦合损耗。在以往的耦合方法中,均采用模斑圆整、数值孔径角压缩或是以组合方式进行。常用的方法有光纤拉锥、烧球等微透镜处理方法或是将透镜、非球面透镜或自聚焦透镜用于光耦合来提高耦合效率<sup>[1]</sup>。但由于 SOA 的结构及其输出模斑非圆对称分布的特殊性,相应的耦合效率不太理想。其对应的对准容差很小,不便推广使用。近期,人们开始考虑用特殊的光波导结构来改善 SOA(或半导体激光器)的输出模场结构<sup>[2,3]</sup>,用以提高光纤与 SOA 之间的光耦合效率,效果比较理想,单模光纤与芯片的单端面耦合损耗通常在 2.6~4 dB。但制作工艺复杂,技术难度很大,目前仍未得到市场化应用。综上所述,寻找一种能够将 SOA 的输出模斑圆整并压缩其数值孔径角的器件至关重要。为此,提出并制作了一种渐变折射率平板波导结构的光耦合器,文中详细介绍了其结构特点,并分析计算了其应用于 SOA 输出光束耦合的可行性。若用此技术,可以将 SOA 与单模光纤的耦合损耗降低至 3 dB 以下。

## 1 光耦合理论分析

SOA 要在光通信中应用,必须与单模通信光纤相连,而芯片与单模光纤之间的光耦合损耗则是长期以来未得到很好解决的一项技术难题。SOA 芯片为掩埋条形异质结构,其有源区为一矩形均匀折射率波导,若设结平面平行于  $x$ - $z$  平面,传输光轴沿  $z$  轴方向,对工作于基模的 SOA,其辐射场可以用基阶高斯模很好地描述,当在自由空间传输时,辐射场为高斯光束近似,束腰位于芯片出射端面上,归一化场分布为<sup>[4]</sup>:

$$\phi_s(x, y) = \phi_x(x, w_x, R_x) \phi_y(y, w_y, R_y) \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\phi_s(x, y)|^2 dx dy = 1 \quad (2)$$

式中  $\phi_x$ 、 $\phi_y$  分别是  $x$ - $z$ 、 $y$ - $z$  平面上高斯光场归一化场分布;  $(w_x, R_x)$ 、 $(w_y, R_y)$  分别是  $x$ 、 $y$  方向高斯分布的模场半宽和波前曲率半径。

与 SOA 耦合的光纤为单模阶跃光纤,其基模传输场也可用高斯光场很好地近似,光纤输出为高斯光束,束腰位于光纤端面上,场分布为圆对称,归一化场分布为:

$$\phi_f(x, y) = \phi_{fx}(x, w_f, R_f) \phi_{fy}(y, w_f, R_f) \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\phi_f(x, y)|^2 dx dy = 1 \quad (4)$$

式中  $\phi_{fx}$ 、 $\phi_{fy}$  分别是  $x$ - $z$ 、 $y$ - $z$  平面上高斯光场归一化场分布;  $w_f$ 、 $R_f$  分别是高斯分布的模场半宽和波前曲率半径。为得到最佳的耦合效果,耦合时两者的模斑位置应该重合,由高斯光束的传输特性可知,在模斑处,  $R_x = R_y = R_f = \infty$ ,两高斯光场耦合时,光耦合效率为:

$$\eta = \eta_x \eta_y = 4[w_x w_f / (w_x^2 + w_f^2)] \cdot [w_y w_f / (w_y^2 + w_f^2)] \quad (5)$$

由公式(5)可以看出,光耦合损耗主要由两者的模斑半径的匹配程度来决定。对于 SOA 器件,由于 SOA 的模斑尺寸很小,为 1~2  $\mu\text{m}$ ,较单模光纤的模斑尺寸小一个数量级,远场输出为椭圆形光斑,且有较大的光束发散角,可达  $45^\circ \times 9^\circ$ 。当与单模光纤耦合时,其模斑尺寸很难与单模光纤圆对称的模斑尺寸及数值孔径角相匹配,单模光纤的模斑尺寸一般为 8~9  $\mu\text{m}$ ,数值孔径角为  $10^\circ$ ,因而,当用光纤与 SOA 耦合时将呈现较大的耦合损耗。为使单模光纤的模斑尺寸与 SOA 的模斑尺寸接近,一种行之有效的方法是将单模光纤的端部制作成圆锥体,即采用电弧放电加热光纤端部,将纤芯与包层成正比例地拉成圆锥体,也可用化学湿法蚀刻技术,其特点是结构小巧、稳定性好、可靠性高、制作工艺简便,但单端光耦合效率也只有 35%左右。仔细分析其耦合机制不难看出,造成光耦合效率较低的主要原因是即使光纤经过拉锥处理,两者的模斑形状和束散角仍然差异很大,而只有当两者的耦合端面的光束出射孔径在形状和尺寸均相近时,才可获得较高的光耦合效率。为此,设计并制作了渐变折射率平板波导光耦合器,该耦合器可以将 SOA 芯片的输出光束在垂直其结平面方向进行扩束,并压缩该方向的束散角,用于提高单模光纤与芯片的光耦合效率。

## 2 光耦合器的设计与制作分析

渐变折射率平板波导光耦合器的示意图如图 1 所示,渐变折射率平板波导光耦合器光轴沿  $z$  轴方向,如图 1(a)所示。 $x$  轴方向折射率分布不变,沿  $y$  轴方向折射率分布为平方率分布<sup>[5]</sup>,如图 1(b)所示。

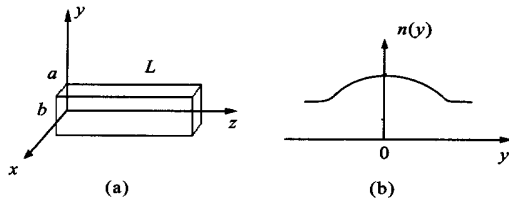


图 1 光耦合器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the coupler

$$n^2(y) = n_0^2(1 - Ay^2) \quad 0 \leq |y| \leq b/2 \quad (6)$$

式中  $n_0$  是平板波导中点的折射率分布值。相对折射率差为  $\Delta$  时,

$$\sqrt{A} = 2 \sqrt{2\Delta/b} \quad (7)$$

聚焦常数  $\sqrt{A}$  反映了渐变折射率平板波导对于光线的会聚能力。在平行于  $y-z$  平面的任意截面上,与自聚焦透镜一样,存在节距:

$$P = 2\pi / \sqrt{A} \quad (8)$$

若取平板波导长度  $L = 0.25 P$ ,则在平行于  $y-z$  平面的任意截面上,与自聚焦透镜一样,对于在其端面沿  $y-z$  平面入射的线光源具有准直作用。若入射线光源的条宽为  $a$ ,光束发散角对应的数值孔径角为  $NA$ ,则经过渐变折射率平板波导光耦合器的变换作用,在平行于  $x-z$  平面方向,光束发散角不变,而在平行于  $y-z$  平面的任意截面上,输出端光束的半径和发散角分别为:

$$a_b = NA / (n_0 \sqrt{A}) \quad (9)$$

$$\theta_b = - a (n_0 \sqrt{A}) \quad (10)$$

应用时,为避免渐变折射率平板波导光耦合器直接接触发光光源,通常取  $L = 0.23 P$ ,或令  $L = 0.29 P$  为宜。

渐变折射率平板波导光耦合器的制作可以通过离子交换工艺进行,这种工艺是将含有硝酸钾

( $KNO_3$ )的多组分玻璃平板浸入到熔融铯盐溶液中,使熔融铯盐中的铯离子( $Tl^+$ )与玻璃中的钾离子( $K^+$ )交换,从而使玻璃板的折射率分布发生变化,通过控制玻璃板在熔融盐溶液中的浸渍温度与时间,可以获得所需要的折射率分布。铯离子( $Tl^+$ )由于半径很小,受周围离子的束缚作用较弱,在高温下容易在玻璃中移动。由于铯离子( $Tl^+$ )的电极化率与其离子半径三次方的比值最大<sup>[6]</sup>,对玻璃的折射率影响也最大,要得到大数值孔径的渐变折射率平板波导光耦合器,采用铯-钾离子对交换的工艺不失为一种好的方法。从制作结果与实测的情况看,效果很好;从制作工艺上看,渐变折射率平板波导光耦合器的制作技术更易于大批量制作,只要将制作的渐变折射率波导平板根据要求即可解理成许多个渐变折射率平板波导光耦合器。

## 3 光耦合器测试

渐变折射率平板波导光耦合器(样品)对激光光束的束散角变换演示实验如图 2 所示。图 2(a)为未经样品变换的半导体激光器输出的准直激光束的光斑投影,波长  $\lambda = 0.67 \mu m$ 。从图 2(b)可以看出,样品对入射的准直激光束在垂直方向进行了较好地发散,且光能在整个范围内分布均匀,而在水平方向,入射光束基本不影响原有光束的传输性能。若一个束散角很大的光束射入样品,由光路的可逆性推知,光束的束散角在垂直方向将得到较好地压缩,而水平方向不变。考虑到渐变折射率平板波导光耦合器在光通信系统中的工作波长是  $1.3 \mu m$  或  $1.55 \mu m$ ,因此,在  $1.3 \mu m$  波长下,对样品进行了参数测试。测试结果为:  $n_0 = 1.6$ ,波导板厚 =  $2.0 mm$ (垂直方向尺寸),轴向宽度  $L = 4.75 mm$ ,焦斑尺寸 =  $0.98 \mu m$ ,对平行光束的出射角  $\theta_0 = 32.25^\circ$ ,  $NA = 0.53$ ,工作距离  $F = 1.82 mm$ ,平板波导透过率  $\geq 89\%$ (不计两端面的菲涅耳反射)。

## 4 应用分析

渐变折射率平板波导光耦合器的作用是扩大 SOA 垂直于结平面方向的模斑尺寸,压缩该方向的

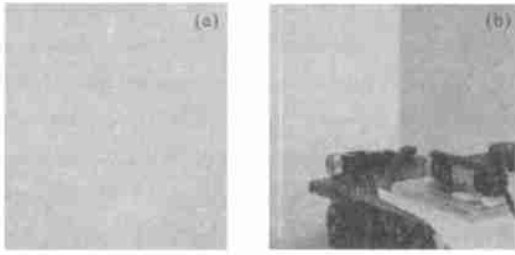


图 2 光束变换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the beam transformation

光束发散角,其应用示意图如图 3 所示。图中,SOA 的输出光的远场分布为椭圆光斑,假设其结平面与图面垂直,在平行于有源条方向的发散角为  $9^\circ$ ,在垂直于有源条方向的发散角为  $45^\circ$ ,用于输出光耦合的单模光纤的远场发散角为  $10^\circ$ 。在垂直于有源条方向,SOA 与单模光纤的远场发散角严重失配,造成了较大的光耦合损耗。而在平行于有源条方向,SOA 与单模光纤的远场发散角匹配较好,不会造成较大的光耦合损耗。为此,采用渐变折射率平板波导光耦合器,并将其置于 SOA 与单模光纤之间。渐变折射率平板波导光耦合器的特点是,在平行于 SOA 的有源条方向,其折射率保持不变,对 SOA 的输出光的作用相当于一个平行平板,该方向的光束远场发散角仍为  $9^\circ$ 。而在垂直于 SOA 有源条的方向上,其折射率由

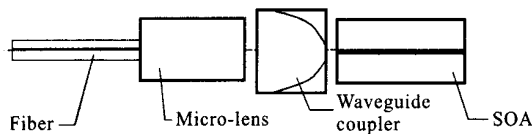


图 3 光耦合应用示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coupling

轴线起逐渐变小,即在该方向,平板波导对 SOA 的输出光的作用相当于一个  $0.25$  节距的自聚焦透镜的作用,由于 SOA 在该方向的尺寸只有  $1 \mu\text{m}$  左右,可以近似看作是线光源,经过渐变折射率平板波导耦合器的扩束准直变换,该方向的光束发散角可以得到较好地压缩,通过仔细调整,设计平板波导的参数,可以控制该方向的光斑尺寸与光斑在结平面平行方向的尺寸接近,再利用现有的自聚焦透镜或拉锥光纤等耦合技术,可以得到较高的光耦合效率,从这点来看,渐变折射率平板波导光耦合器的作用和柱面镜相同,但其

制作工艺简单、成熟,且适于大批量制作,成本很低。

渐变折射率平板波导耦合器对 SOA 的光耦合实验是采用经过  $1 \text{ kHz}$  调制的波长为  $1.29 \mu\text{m}$  的单模半导体激光器的输出光作为信号光,由于 SOA 的自发辐射谱的中心波长为  $1.29 \mu\text{m}$ ,所以选用了波长与之接近的激光光源。信号光经过偏振控制器后输入给 SOA 芯片,经过芯片时,由于芯片有源区增益介质的放大作用,使信号光得到有效增强,经过光放大以后的光信号将通过芯片另一端的渐变折射率平板波导耦合器耦合输出,再利用现有的带尾纤的自聚焦透镜耦合于单模光纤中,用  $1 \text{ kHz}$  的选频放大器记录输出信号的大小,并与输入信号比较,得出耦合信号光的增益值。为测出 TE、TM 两个偏振模的增益值,在 SOA 芯片的两端尚需加入偏振器件。图 4 为 SOA 对单模光纤输出的增益曲线。实验得到的最大增益约为  $14 \text{ dB}$ 。将样品和带尾纤的自聚焦透镜移开,再直接对 SOA 芯片的输出光信号进行探测并分析比较可知,样品和带尾纤的自聚焦透镜的组合式光耦合器的光耦合损耗约为  $3 \text{ dB}$ 。

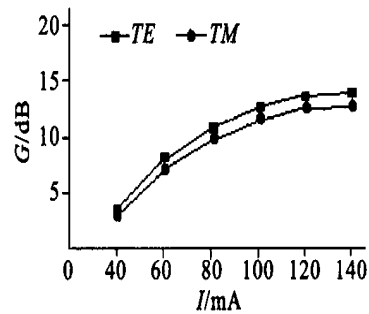


图 4 SOA-光纤的光增益曲线

Fig. 4 SOA-to-fiber gain against driving current

## 5 结 论

SOA 在通信网络中的低接入损耗是多年来未得到很好解决的一个技术难题,这直接影响到 SOA 器件的高增益特性,也影响着半导体光放大器的市场化应用。通常 SOA 的模斑尺寸很小,很难与单模光纤圆对称的模场相匹配,为提高光纤与 SOA 耦合时的光耦合效率,必须对 SOA 半导体光放大器的输出光束进行整形变换。以往的耦合方法中,通常采用光纤拉锥、烧球等微透镜处理方法或是利用透镜、非球面

透镜或自聚焦透镜,耦合效率不太理想。其对准容差很小,不便推广使用。文中提出的渐变折射率平板波导结构的光耦合器可以较好地对接半导体光放大器的输出光束进行整形变换,光耦合效率高,且可放宽对准容差的要求,若用两个渐变折射率平板波导结构的光耦合器组合配对使用,将会得到更好的效果。

### 参考文献:

- [1] Khoe G D, Poulissen J, De Vrieze H M. Efficient coupling of laser diodes to tapered monomode fibres with high-index end[J]. *Electron Lett*, 1983, 19(6): 205-207.

- [2] Kim J R, Lee J S, Park M W, et al. Spot-size converter integrated polarisation insensitive semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(8): 967-969.
- [3] Bruckner I J, Mersali B, Sainson S, et al. Tapered-waveguide integration for polarisation insensitive InP/InGaAsP based optical amplifiers[J]. *Electron Lett*, 1994, 30(16): 1290-1291.
- [4] 刘德明,刘雪峰,黄德修. 行波半导体激光放大器耦合技术研究[J]. *光学学报*, 1992, 12(4): 308-312.
- [5] 刘德明,向清,黄德修. 光纤光学[M]. 四川:电子科技大学出版社, 1995.
- [6] 刘德森,高应俊. 变折射率介质的物理基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1991.

(上接第 203 页)

其中,在数据处理过程中应考虑多行斜缝匹配时空间频率的归一化。

## 4 影响结果的因素分析和讨论

### (1) 空不变(VLD)系统线性条件和 MTF 模型

在红外热像系统的 MTF 测量中,整体系统的线性和空不变条件是进行测试的理论基础,保证同样空不变性质是进行斜缝法 MTF 测量的基本前提。其中包括光学部件、被测系统、光电转换、电子线路等整体系统线性影响。

### (2) 均匀黑体、狭缝靶标对制造工艺的影响

如上节所述,斜缝法 MTF 测量的前提是狭缝边缘在不同空间位置的狭缝响应为均匀等值,所以测试中狭缝必须能够满足 LSF 采样的信号强度、且宽度均匀、无毛刺、无突变,对狭缝的缝宽有一定要求。

### (3) 测试系统诸参数的影响

在光学部分:平行光管、镜头的分辨率像差、畸变;CCD 探测器的技术指标:像元尺寸、分布间隙、暗电流、均匀性、线性、灵敏度;在整体测试系统硬件设计中参与成像的各光学系统部件的波像差小于被测光学系统的  $1/3 \sim 1/5$ 。

### (4) 数据噪声的影响

在使用斜缝匹配法进行 MTF 测量时,应该结合测试系统采取各种降噪处理,如采取对热成像系统的闪变、跳越信号重叠等现象的处理;背景扣除;LSF 截尾;时间和空间序列平均等措施减小数据噪声。

## 5 结束语

斜缝法测定调制传递函数的实质是对传统线扩展函数法的改进。通过条件控制使整体测试系统各部分及热像仪系统基本满足测试条件后利用斜缝匹配法进行 MTF 测量,在粗调的基础上直接进行,不再需要复杂的微调。所采集的数据按照其数据组成的分布特点进行分析,使用软件处理的办法完成后续处理工作。这对于提高测试精度、降低测试成本具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] Nicolas Guerineau, Jerome Primot, Michel Tauvy, et al. Modulation transfer function measurement of an infrared focal plane array by use of the self-imaging property of a canted periodic target[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(4): 631-637.
- [2] Gerald C Holst. *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*[M]. Co-published by SPIE and JCD Publishing Co. 1998.
- [3] Castleman K R; 朱志刚,林学渊,石定机,等. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 1998.
- [4] Eli Levy, Doron Peles, Michal Opher-Lipson, et al. Modulation transfer function a lens measured with a Radom target method[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(4): 679-683.
- [5] 龚瑞昆. 改善传感器特性的软件处理方法[J]. *传感器世界*, 2001, 7(2): 43-47.
- [6] 房红兵,尹宝全,皮德富. 凝视热成像系统 MTF 测试技术分析[J]. *红外与毫米波学报*, 1998, 17(2): 125-128.