

半导体激光器和光纤耦合的实现方法^x

王田虎

(新乡学院 物理系, 河南 新乡 453003)

摘要: 从波动理论出发, 分析了半导体激光器与光纤耦合的理论, 讨论了实现半导体激光器和光纤耦合的方法, 其中锥端球面微透镜耦合效率可达到 80%, 展望了半导体激光器和光纤耦合技术的发展前景。

关键词: 耦合; 光纤; 半导体激光器; 光纤通信

中图分类号: TN253

文献标志码: A

文章编号: 100807613(2007)05003404

0 引言

自 20 世纪 70 年代初, 美国康宁公司成功地研制出世界上第一根实用化石英光纤以来, 以光纤为传输媒介的光纤通信和由此派生出来的光纤传感器技术得到了飞速的发展。在使用光纤传送光束的光路结构中, 往往以半导体激光器(LD)作光源, 光纤与光接收机之间是利用耦合技术来实现连接的, 所以, 耦合效率的高低直接影响光纤通信系统的性能。半导体激光器同光纤的耦合系统概括起来可分为两大类: 采用分立的小型或微型光学元件构成的耦合系统和采用在光纤端面制作微透镜的耦合系统^[1-3]。后一类系统的优点是灵活方便, 易于集成封装和加工制作。

1 半导体激光器与光纤的耦合理论

半导体激光器与光纤的高效率耦合, 主要取决于半导体激光器的输出光场与光纤(以单模光纤为例)本征模之间的模式匹配程度。因此, 在计算耦合效率前, 必须了解半导体激光器输出场和单模光纤本征模场的分布形式。

半导体激光器具有多层平板介质波导或矩形波导结构, 而且有源区的截面尺寸很小, 一般为 0.15 Lm@ (2~ 4) Lm, 其远场为椭圆对称高斯光束, 且发散角大, 一般情况下, 在平行于结平面方向上的光束发散角为 10°~ 20°, 在垂直于结平面方向上的光束发散角为 30°~ 40°。在高斯近似条件下, 半导体激

光器基模输出场的近场分布可表示为^[1-3]

$$W = W \exp \left[2 \left(\frac{x^2}{w_{0x}^2} + \frac{y^2}{w_{0y}^2} \right) \right]$$

式中 W 为场振幅, X_{0x} 、 X_{0y} 为半导体激光器前端面上 x (垂直于结平面) 和 y (平行于结平面) 方向上的光束束腰半径。

在标量近似下, 单模光纤的导波本征模 $E(r)$ 可以用 Bessel 函数来表示

$$E(r) = \begin{cases} J_0(urPa) & r \leq a \\ \frac{J_0(u)}{K_0(w)} K_0(wrPa) & r > a \end{cases}$$

式中 J_0 为第一类贝塞尔函数, K_0 为第二类贝塞尔函数, L 、 X 为归一化横向模式系数。上式的具体表达形式比较复杂, 有时为了计算方便, $E(r)$ 也可以采用高斯形式来近似。当单模光纤的归一化频率 $V > 0.75$ 时, 有

$$E(r) = \exp[-r^2 P w_F^2]$$

其中

$$w_F = a(0.65 + 1.619Pv^{1.5} + 2.879Pv^6)$$

非理想情况下的光纤端面激光辐射场分布可近似表示为

$$W_c = W \prod_{i=1}^n F_i(x, y) \quad x, y \in WA$$

在知道单模光纤端面上的激光辐射场 W' 和单模光纤本征模 $E(r)$ 的具体形式后, 我们即可以根据

^x 收稿日期: 20070306

作者简介: 王田虎(1980), 男, 河南辉县人, 新乡学院物理系教师, 硕士, 主要从事激光应用与光电测技术研究。

下式计算半导体激光器与单模光纤的耦合效率^[4]:

$$G = - 10 \lg \left[\prod_{j=1}^n (1 - R_j) \# \frac{|k_A \dot{W} \# \langle \langle^* ds|^2}{k \dot{W} \dot{W}^* ds k_A \langle \langle^* ds} \right] \quad (\text{dB})$$

式中 R_j 为耦合系统中第 j 个光学界面的总反射率。上式表明, 半导体激光器与单模光纤之间的耦合损耗主要由两方面因素造成: 一是各光学界面上的光功率反射损耗, 另一个是单模光纤端面上的激光辐射场 \dot{W} 和单模光纤本征模 5 之间由于振幅分布和等相位面分布的失配而造成的模式耦合损耗。

2 半导体激光器与光纤的耦合方式

半导体激光器与光纤的耦合可以分为两大类^[1]: 一种是分离透镜耦合, 即在光源和光纤之间插入光学元件的方法, 如插入透镜、棱镜等; 另一种是光纤直接耦合, 即光纤和光源直接耦合, 而不经任何系统。无论哪种方法, 目的都是对激光器发出的光场进行整形, 使入射光场与光纤本征光场分布达到最大可能的匹配。

2.1 分离透镜耦合

耦合系统内部各光学元件之间以及耦合系统与光纤是分立的, 此时对半导体激光器、光学耦合系统和光纤之间的共轴准直要求较高。在进行组件封装时, 为了保证较高的共轴性, 通常采用一些形状特殊、加工精度较高的支承件固定各光学元件, 这就使成本较高, 并且整体尺寸较大; 为减小体积, 系统中光学元件的尺寸一般在毫米量级, 因而加工困难, 价格昂贵。然而, 这类耦合系统的一个突出优点是通过对精确设计和加工(如采用精密的消球差结构和在光学元件端面镀制减反膜等)可以最大限度地减少反射损耗、消除像差影响、改善光束非圆对称性, 从而实现高效率耦合。下面介绍几种典型的由分光元件构成的光学耦合系统。

2.1.1 单球透镜耦合

由单个球透镜构成的耦合系统, 球透镜本身的圆对称性使其装配要比其他透镜方便。单个球透镜的球差与透镜的焦距成正比, 因此, 减小球差来提高耦合效率是这种耦合方法的关键。为了消除球差的影响, 这种耦合系统中的球透镜一般具有直径小(短焦距)、折射率高的特点。这种方式的耦合效率主要取决于光纤与透镜的距离和激光器与透镜的距离。其系统结构如图 1 所示。

2.1.2 利用自聚焦透镜

自聚焦透镜是利用离子交换技术在圆柱状玻璃

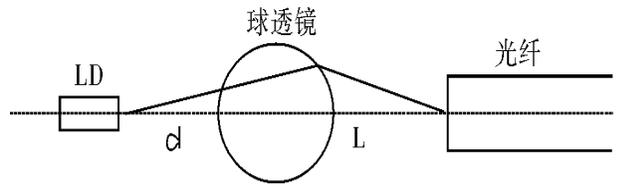


图 1 单球透镜耦合系统的示意图

基棒内产生径向的折射率分布制成的, 它的聚光能力是依靠折射率的渐变分布来实现的, 焦距由透镜长度决定。平端自聚焦透镜球差较严重, 会聚光斑较大, 可把前端研磨成球面, 补偿透镜的球差, 耦合损耗可降为 1 db 左右^[3]。自聚焦透镜外形尺寸较小, 数值孔径较大, 损耗较低, 但透镜的折射率分布优化需精密测量和复杂计算, 透镜的加工过程需要对曲率球面进行精密研磨, 增大了制作难度和成本。图 2 为利用自聚焦透镜耦合示意图。

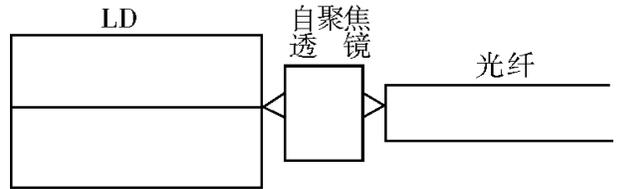


图 2 自聚焦耦合系统示意图

2.1.3 利用组合透镜

在许多光纤耦合系统中, 常利用柱透镜、球透镜、自聚焦透镜及锥形光纤等相互组合来提高耦合效率^[6,7]。其组合方式较多, 典型的如图 3 所示。利用组合透镜可将耦合效率大幅度提高, 通常可达到 75% 以上。但装配时需要用专用精密夹具来精

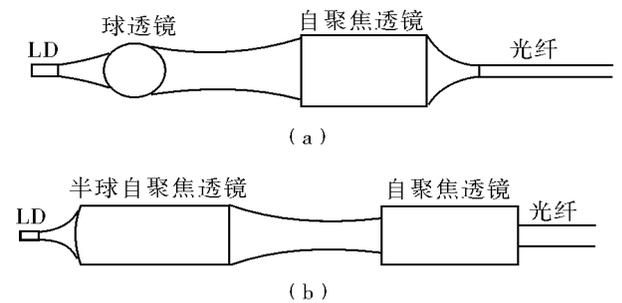


图 3 几种组合透镜式光学耦合系统示意图
精密调整, 增加了工作难度, 并且封装阶段要求较高。

2.2 光纤直接耦合

光纤直接耦合包括平端光纤直接耦合和对光纤进行加工耦合的方法, 如在光纤端面制造球形、锥形等。这种耦合系统灵活方便, 易于集成封装和加工制作, 因而得到广泛的应用。下面介绍几种常用的光纤直接耦合方法。

2.2.1 平端光纤直接耦合^[8,9]

平端光纤直接耦合是指把端面已处理的平头光

纤直接对向半导体激光器的发光面。影响耦合效率的主要因素是光源的发光面积和光纤芯径总面积的匹配以及光源发散角和光纤数值孔径角的匹配。半导体激光器与光纤之间存在严重的模失配,采用平端光纤直接耦合,损耗将会很大,耦合方式效率较低。图 4 为平端光纤直接耦合示意图。

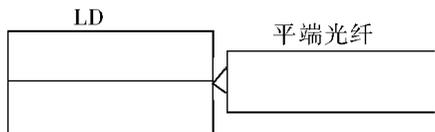


图 4 LD 和平端光纤直接耦合

2.2.2 球形端面光纤直接耦合^[10,11]

获得球形光纤端面的方法有很多种。一种比较简单的方案是在光纤端面上制造一个树脂的半球透镜;另一种更实用的方案是在光纤的端面烧制出特殊形状的端球,烧制的热源可以采用电弧、气体火焰或大功率激光器。光纤端面在这些热源的作用下,熔化后再自然冷却,在表面张力的作用下就会形成各种弧度的圆球形端面,圆球的曲率半径与热源的温度和光纤与热源的距离有关。采用球形光纤端面不仅可以提高半导体激光器与光纤的耦合效率,而且利于实验光路调试。图 5 是利用光纤熔接机的电极放电获得的几种球端面,图 6 是 LD 和球形端面光纤直接耦合示意图。

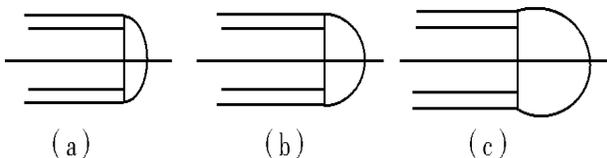


图 5 光纤端部的球面

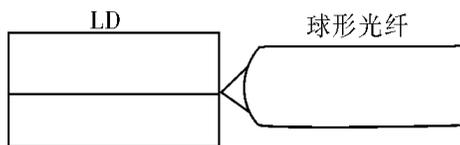


图 6 LD 和球形端面光纤直接耦合

2.2.3 锥形光纤直接耦合

制作锥形光纤的方法有腐蚀、磨削和加热三种方法,前两种方法将光纤包层制成锥体而保持芯径不变,后一种方法则利用电弧放电加热或者利用熔融拉锥机加热,使纤芯与包层一起成比例地拉伸成一定长度和锥度的锥体。这两种方法得到的锥形光纤系统有着不同的特性,利用加热方法制造的锥形光纤其芯层也为锥形结构,能够获得更高的耦合效

率,在增大锥角以获得更大的耦合效率的同时,最佳工作距离也随之减小。这种耦合系统的耦合损耗一般在 4 dB~ 5 dB, x、y、z 方向的 1 dB 失调容差分别为 1.5 Lm、0.7 Lm、8.5 Lm。严格控制微透镜曲率半径可以获得 2 dB 的耦合损耗,光反馈损耗约为 -38 dB,但 1 dB 失调容差也会有所降低。如果锥形末端制作一个高折射率长椭球微透镜,则耦合损耗还可进一步降低。当半导体激光器位于微透镜的前焦点时,在微透镜的后焦点可以获得高斯光束的新束腰;若光纤的端面位于微透镜的后焦点上,则高斯光束可以有效地耦合到光纤中。对于半球形微透镜而言,其焦距远大于透镜的厚度 R,因此,不满足最佳耦合条件。我们利用熔融拉锥机在这方面开展了一些研究,其中所做的锥形光纤和半导体激光器的耦合效率最高可以达到 75%。图 7 是 LD 和锥形光纤直接耦合示意图。

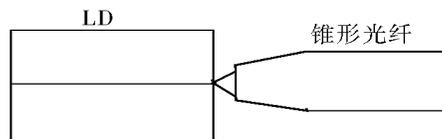


图 7 LD 和锥形光纤直接耦合

2.2.4 锥端球面透镜直接耦合

在目前所有耦合方法中,锥端球面微透镜应用最广,其制作方法是先将光纤端部制成锥形,以减小端面半径,然后,在锥端形成微透镜。制作锥形光纤的方法如 3.3 中所述。形成微透镜也有两种方法^[12,13]。一是直接电弧抛光、整形;二是把锥端处理后,浸入熔融高折射率玻璃中,控制浸入深度、时间长短从而得到不同大小及形状的锥端高折射率微透镜。锥端球面透镜耦合效率一般可达 50%~60%,最大可达 80% 左右。蚀刻锥型传输效率受球面半径 R 影响较大,而熔拉锥型耦合效率受球面半径影响较小,实验结果显示,熔拉锥球面半径在 5 Lm~20 Lm 的范围内,耦合效率都能保持 80% 左右。图 8 是 LD 和锥端球面透镜直接耦合示意图。

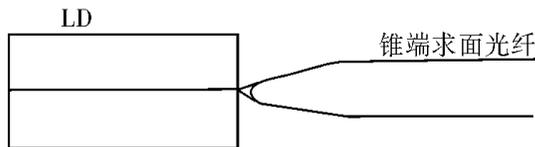


图 8 LD 和锥端球面光纤直接耦合

3 小结

本文讨论了实现半导体激光器和光纤耦合的方法,其中光纤微透镜直接耦合技术因其结构紧凑、制

作简单、成本低而耦合效率较高等突出优点获得了最广泛的应用,但它的偏移容差最小,难于调整,稳定性不够好。手工制作时,重复性较差。鉴于LD大发散角,增大耦合透镜的数值孔径及获得成本较低、能显著减小象差的光纤微透镜仍是人们不懈努力的方向。此外,集成光学、二元光学的发展,有可能使我们获得成本较低而消球差特性良好的微透镜。同时,改进LD本身的结构和工艺,从而改善其光束特性,也有利于减少耦合损耗。

参考文献:

- [1] 黄德修,刘雪峰. 半导体激光器及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 220- 230.
- [2] Thual M, Chanclou P, Gautreau O. Appropriate micro-lens to improve coupling between laser diodes and singlemode fibres [J]. Electronics Letters, 2003, 39(21): 1504- 1506.
- [3] COTE M, SHANNON R R. Waveguide coupling optimization using lenses in laser diode chip and packaging technology[C]. CHEN P C, MILSTER T D, eds. SPIE, 1995, 2 610: 160- 166.
- [4] Modavis R A, Webb T W. Anamorphic microlens for laser diode to single-mode fiber coupling. IEEE Photonics Technol Lett, 1995, 7(7): 798.
- [5] SHUAI Ci-jun, DUAN Ji-an, ZHONG Jue. Experimental measurement and numerical analysis of fused taper shape for optical fiber coupler[J], Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(2): 251- 254.
- [6] 张健. 耦合半导体激光进入光纤[J]. 激光技术, 1996, 20(3): 129- 132.
- [7] Sanuwatari M, Sugie T. Efficient laser diode to single-mode fiber coupling using a combination of two lenses in confocal condition. IEEE J. Quantum Electron., 1981, QE- 17: 1021.
- [8] 牛岗, 樊仲维, 王家赞, 潘树志. 大功率半导体激光光纤耦合技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(3): 34 - 38.
- [9] Yoda H H. A new scheme of a lensed fiber employing a wedge-shaped graded-index fiber tip for the coupling between high-power laser diodes and single-mode fibers[J]. Journal of lightwave technology, 2001, 19(12): 1910- 1917.
- [10] 杨瀛海, 吴金生, 俞本立, 李伟. 球形光纤端面效应及其应用[J]. 光学技术, 1999(7): 55- 56.
- [11] ZHOU Chong-xi, LIU Yin-hui, XIE Wei-ming. Analysis and design of coupled high-power laser diode array[J]. Chinese Journal of Laser, 2004, A31(11): 1296- 1300.
- [12] 聂刚, 李宝红, 刘德修, 黄德修. 半导体激光器到单模光纤的高效耦合技术[J]. 光通信技术, 1996(2): 164- 165.
- [13] Tang H Q. Cylindrical lensed fibers optimized for 980nm pump laser diode coupling[J]. SPIE. 2002, 4905: 157- 160.

=责任编辑 邢怀民>

The Method of Laser Diodes to Fibers Coupling

WANG TianChu

(Department of Physics of Xinxiang University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: This paper proceeds from fluctuation theory of the optic fiber, has analysed the principle and method of the techniques of Laser Diodes to fibers coupling. The coupling efficiency of optic fiber of the sphere and awl lens can be up to 80% among them. Finally, the recent development of it is briefly discussed.

Key words: coupling; fiber; Laser Diodes; fiber optic communication