

文章编号: 1001-3806(2007)04-0416-03

星间激光通信发射终端耦合单元的研究

刘宏展¹, 刘立人²

(1. 华南师范大学 光子信息技术实验室, 广州 510006; 2 中国科学院 上海光学精密机械研究所 信息光学研究室, 上海 201800)

摘要: 针对星间光通信系统的要求, 采用一种新型的半导体激光耦合方案, 用前后正交的非球面柱面透镜准直半导体激光束, 再经渐变折射率 (graded refractive index, GRN) 自聚焦透镜聚焦, 把光束耦合入单模光纤。就此耦合单元, 对耦合效率随半导体激光器的位置偏离及角度偏移进行了研究, 在光纤尾纤处测得了输出功率随驱动电流的变化关系, 单模运行的半导体激光二极管经耦合后的出纤功率可以达到 80mW。结果表明, 耦合效率随位置偏离及角度偏移的变化灵敏度都不高, 这可以满足星间光通信的要求。

关键词: 激光技术; 半导体激光; 单模光纤; 星间光通信; 光耦合

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Research of the optical coupling unit for the transmitting terminal of intersatellite optical communication system

LIU Hong-Zhan¹, LIU Li-Ren²

(1. Laboratory of Photonic Information Technology, The South China Normal University, Guangzhou 510006, China; 2. Information Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The laser diode-coupling unit is an important part of an intersatellite optical communication system. In terms of the requirement of the intersatellite optical communication system, a new coupling method was proposed, in which an aspherical cylindrical lens, whose front cylindrical lens is orthonormal to its back cylindrical lens, was used to collimate the laser beam, and then the beam was focused by a GRN lens and coupled to a single-mode fiber. How the coupling efficiency changing with the fiber position displacement and fiber axial angle variation was studied, and it was found that the coupling efficiency was insensitive to both the above parameters. Furthermore, the optical power versus the driver current at the end of the fiber was tested, and 80mW output power was obtained, which showed the optical unit satisfied the designed request.

Key words: laser technique; semiconductor laser diodes; single-mode fiber; intersatellite optical communication; optical coupling

引 言

与微波通信相比, 星间激光通信具有信息量大、体积小、重量轻、抗干扰能力强以及保密性好等优点, 它越来越受到各国政府的重视^[1,2], 国内也于上世纪 90 年代初在这一领域展开了研究。作为一个完整的系统, 它是由很多单元构成的, 其发射终端的半导体激光耦合单元, 是整个系统的核心单元之一。由于星间通信距离远致 45000km, 对这光耦合系统提出特殊的要求^[3]: 它要求半导体激光器 (LD) 要有超长的使用寿命和极高的可靠性, 即在 10 年的使用期内, 每 1500h 连续运行周期内的可靠性要达到 99%; 另外, 由于通信

距离远, 要求光束要有高质量、大功率密度、单模传输; 同时, 系统的耦合效率应尽量地高。因此, 设计出符合要求的耦合单元是一项很有意义的工作。对激光耦合的研究, 是半导体激光应用所急需解决的问题之一, 近年来, 研究人员都在尝试采用不同的耦合方式来提高耦合效率^[4~8]。作者针对星间激光通信系统的特殊要求, 区别于已有的耦合方案^[3,9], 采用前后正交的非球面柱面透镜集成一体的准直模块来准直宽面发射、200mW 单模运行 LD 的激光束, 并通过前后两非球面柱面透镜来消除 LD 的像散, 获得消像差和像散的近平行、对称的激光束, 此激光束再经渐变折射率 (graded refractive index, GRN) 自聚焦透镜聚焦, 最后被耦合入单模光纤, 实现高效能的耦合。对此耦合单元, 还研究了耦合效率随半导体激光器位置偏离及角度偏移的变化趋势; 最后, 经实验测量, 光纤的出纤功率可以达到 80mW, 这说明本耦合单元满足通信系统的要求^[10]。

作者简介: 刘宏展 (1975-), 男, 博士, 讲师, 现主要从事激光通信、光学检测等方面的研究。

E-mail: lhzh@yaho.com.cn

收稿日期: 2006-07-25; 收到修改稿日期: 2006-08-29

1 耦合系统的设计

LD 与单模光纤的耦合时,其高度椭圆的模场与单模光纤的圆形对称模场失配;同时 LD 的侧向发光面很宽,其模径与单模光纤 (小于 $\varnothing 10\mu\text{m}$) 的模径严重失配;加上 LD 的快轴束波面严重弯曲,而慢轴接近平面束波面,使得波束相面的不对称弯曲与单模光纤的平面束波面也失配等因素的影响,若直接耦合,则耦合效率很低,因此,一般不采用直接耦合方式。通过在 LD 和单模光纤之间插入微透镜等光学元件可以有效地汇聚 LD 的输出光束,使光束与单模光纤的场模匹配,并能明显改善 LD 与单模光纤的耦合,提高耦合效率,因此,采用间接耦合方式,其耦合单元如图 1 所示。

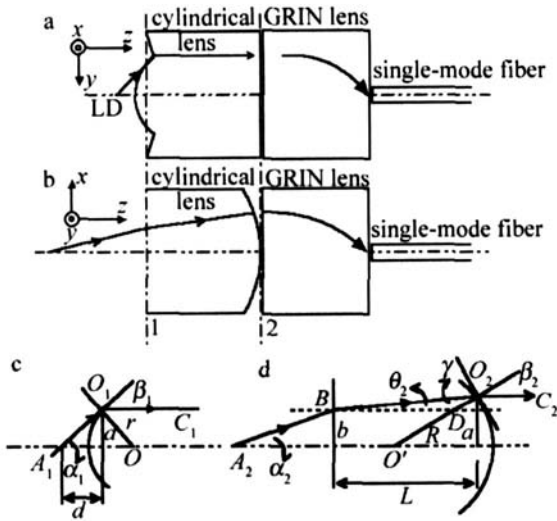


Fig 1 Schematic illustration of coupling LD to an SMF through a spherical cylindrical lenses and a GRIN lens
a—side view (xz plane) b—top view (xy plane) c—the cylindrical lens to the front d—the cylindrical lens to the back

考虑到 LD 所发光束的特殊性,采用两块正交非球面柱面透镜集成一体的准直模块来准直 LD 的激光束,准直模块中的前非球面柱面透镜具有最佳化的双曲面曲率^[11],其结构见图 1a,它能准直 LD 快轴激光束,并校正弯曲相面变成近平面相面,消除光束的像差;而后柱面透镜 (见图 1b)能准直 LD 的慢轴扩展源像散,缩小束散和源尺寸,通过前后两柱面透镜的作用,在平面 2 处,将获得已消除像差和像散的近平行、对称的准直激光束。准直后的激光束经过自聚焦透镜 (GRIN lens) 的聚焦,使其能与单模光纤的场模匹配,实现高效耦合。

图 1c 和图 1d 分别是设计本非球面柱面透镜的详细光路图。本耦合单元采用 200mW 连续输出的 LD,它的发光面为: $100\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$; 光束发散度 $\theta_{\perp} \times \theta_{\parallel} < 80^{\circ} \times 12^{\circ}$ (全宽为 $1/e^2$); 波长 $\lambda = 800\text{nm}$, 并约定准直后的光束直径 $\leq \varnothing 1\text{mm}$ 。前透镜用来准直 LD 的窄面、大发散度光束,当 $\alpha_1 = 40^{\circ}$ 时,要使设计出的透镜

能让光线平行光轴射出,即如图 1c 中的光线 O_1C_1 ,也就是说光线若 O_1C_1 逆向入射,则它恰好满足全反射条件,故有以下关系: $\alpha = 0.5\text{mm}$, $\beta_1 = 50^{\circ}$, $n = \sin\beta_1 \approx 1.3$, $d = a / \tan\alpha_1 = 0.6\text{mm}$, $r = a / \sin\beta_1 = 0.65\text{mm}$; 另外,这里用半球面镜的焦距公式来近似非球面镜,则前非球面镜的焦距 $f_1 = \frac{r}{n-1} = \frac{0.65}{1.3-1} \approx 2\text{mm}$ 。后准直镜用来准直 LD 的宽面、小发散度光束,如图 1d 所示,也要求光线 O_2C_2 能平行光轴射出。由 $\alpha_2 = 6^{\circ}$, $n = 1.3$ 和折射定理得 $\theta_2 \approx 5^{\circ}$; 且 $\theta_2 + \gamma = \beta_2$, $\sin\beta_2 / \sin\gamma = n$, 则 $\gamma \approx 14^{\circ}$, $\beta_2 = 19^{\circ}$, $R = a / \sin\beta_2 = 1.5\text{mm}$, $f_2 = \frac{R}{n-1} =$

$\frac{1.5}{1.3-1} = 5\text{mm}$ 。准直透镜的长度 L 与 LD 的位置有 $1.3-1 = 5\text{mm}$ 。准直透镜的长度 L 与 LD 的位置有关,根据前透镜的设计,这里的 $L \approx 4\text{mm}$, 而它的宽、高没有特殊要求,设计中令它们分别为 2mm , 3mm 。最后得准直透镜参数,它们是:前非球面柱面透镜焦长 $f_1 = 2\text{mm}$, 曲率半径 $r = 0.65\text{mm}$; 后非球面柱面透镜焦长 $f_2 = 5\text{mm}$, 曲率半径 $R = 1.5\text{mm}$; 其大小为 (长 \times 宽 \times 高): $4\text{mm} \times 2\text{mm} \times 3\text{mm}$ 。

渐变折射率微透镜是使准直光束能聚焦到单模光纤中去,这里选择 $1/4$ 节长即可。光纤采用标准熔融突变折射率单模光纤: $NA = 0.11$, $\phi_{\text{MFD}} = 9\mu\text{m}$, $\phi_c = 125\mu\text{m}$, 长度为 1.5m 。整个耦合单位的各个端面,对 LD 的工作波长镀有增透膜,以便减少反射损耗。

2 实验

进行耦合实验时,将 LD 固定在一个三维精密调整架 ($x, y, z, \theta_{yz}, \theta_{xz}$) 上,把正交非球面柱面透镜、自聚焦透镜和光纤固定在一个光耦合专用三维调整架 (x, y, z) 上。实验时,先把 LD 的驱动电流固定在某个值,并调整两个调整架,使得 LD、正交非球面柱面透镜、自聚焦透镜和光纤共轴;然后,按照以上计算结果,调节 LD 使它到正交非球面柱面透镜的距离 $d = 0.6\text{mm}$, 这一距离一直保持不变;之后,分别检验耦合器的输出功率随位置偏差 (x, y) 以及角度偏差 (θ_{yz}, θ_{xz}) 的变化关系,实现系统的最佳耦合。首先考查耦合器耦合效率随位置偏差 (x, y) 的变化关系,如图 2a 所示。实验时,只要分别在 x, y 方向上调整固定 LD 的调整架,便可以得到耦合效率随 LD 在 x, y 方向上位置的改变,而产生相对变化的关系曲线。从图可知,耦合效率对 x 轴方向上的灵敏度比 y 轴上的小。可以这样来解释,把位移偏差与对应方向上光束的宽度的比值定义为位移偏差相对量。在 x 轴方向上,光束较宽且近似平行,当它小量偏离 z 轴时,位移偏差相对量小,故位

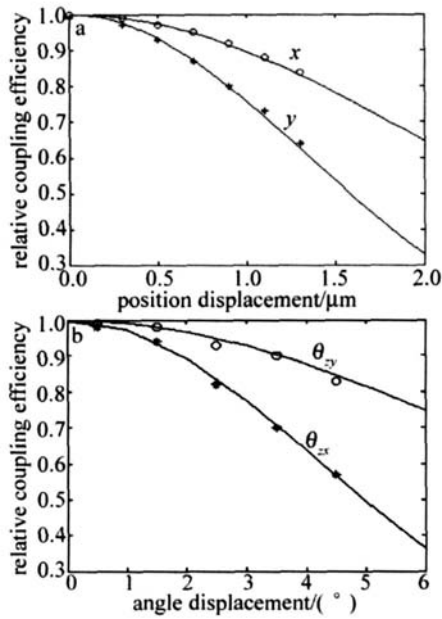


Fig 2 a—coupling efficiency versus fiber position displacement b—coupling efficiency versus fiber axial angle variation

移偏差对耦合效率影响小;与此相反,在 y 轴方向上,光束很窄,当有小量偏差时,其位移偏差相对量大,它对耦合效率影响也相应地大。接下来,再考查耦合器耦合效率随角度偏差 (θ_{yz} , θ_{xz}) 的变化关系,这通过调节固定 LD 的调整架的左右偏转及上下俯仰可以实现,其结果如图 2b 所示。从图可以看出,耦合效率的角向灵敏度在 y 轴方向不大,而在 x 轴方向相对大些。这可以这样来解释,在 y 轴方向,由于 LD 的发散度大,当有小量的角度偏转时,其产生的相对变化并不大;而在 x 轴方向,由于 LD 的发散度小,当有小量的角度偏转时,其产生的相对变化就变大了,于是出现了图 2b 所示的结果。综合图 2a、图 2b,因采用了正交非球面柱面准直模块,系统对位置和角向灵敏度都不高,有较好的容错性能,有利于耦合的方便实现。

各部件经过最佳调整后,被胶合固定于专用金属构件上,再将其紧固在装有制冷器的激光器管壳内,

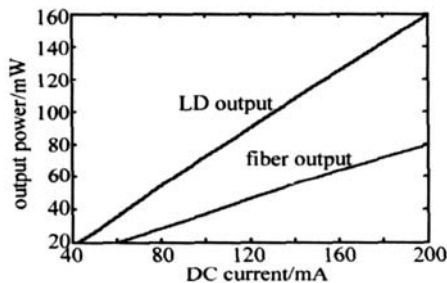


Fig 3 Comparison of $P-I$ properties between fiber coupling output and LD output

最终形成 LD 的单模光纤耦合输出单元。图 3 为 LD 的耦合前后 $P-I$ 特性曲线,输出功率是在 1.5m 长的单模光纤的尾纤处测得的,在驱动电流达到 200mA 时,光纤尾纤的输出功率可以达到 80mW,本耦合器完全符合星间光通信的要求^[10]。

3 结论

提供了一种新的耦合方案,即采用前后正交的非球面柱面透镜准直激光束,再经折射率渐变自聚焦透镜把激光束聚焦耦合入单模光纤的耦合方式。经实验测定,其尾纤的出纤功率可以达到 80mW,这足以满足星间通信系统的特殊要求。实验中还发现:耦合效率对位置变化和角度偏转变化的灵敏度较低,这为实际操作带来方便。

参考文献

- [1] LLURENT B, DUCHMANN O. The silex project: the first European optical intersatellite link experiment [A]. Free-space Laser Communication Technologies III [C]. Washington: SPIE Press, 1991. 2~12
- [2] BISWAS A, WILLIAMS G, WILSON K E. Results of the STRV-2 lasercom terminal evaluation tests [A]. Free-space Laser Communication Technologies X [C]. Washington: SPIE Press, 1998. 2~13.
- [3] MALAISE D, RENARD M. Silex beacon [A]. Free-space Laser Communication Technologies IV [C]. Washington: SPIE Press, 1992. 337~343.
- [4] LI W J, YAN F A, WANG Sh Y *et al*. Study of space coupling technology of fiber bundle coupling LD output beams [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 304~307 (in Chinese).
- [5] CAO Q S, TONG L X, JIANG J F *et al*. The four-pass pumped coupling system of the high power diode lasers stack [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 135~137 (in Chinese).
- [6] WEI W L, OU P, YAN P *et al*. Side-pumping coupler technology for double-clad fiber [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 116~120 (in Chinese).
- [7] DONG Sh F, CHENG G H, YANG L Zh *et al*. Studies on the pump coupling and laser feedback in double cladding fiber lasers [J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 523~525 (in Chinese).
- [8] SHIRAIISHI K, YODA H, ENDO T *et al*. A lensed GD with a long working distance for the coupling between laser diodes with elliptical fields and single-mode fibers [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2004, 16(4): 1104~1106.
- [9] MALAISE D, COLLIER J. Laser diode-fiber link for the transmitter of the SOUT program and for the beacon of the silex program [A]. Free-space Laser Communication Technologies V [C]. Washington: SPIE Press, 1993. 93~120.
- [10] MENKE B, LÖFFLER R. Comparative life test of 0.8μm-laser diodes for SLEX under NRZ and QPM modulation [A]. Free-space Laser Communication Technologies III [C]. Washington: SPIE Press, 1991. 316~327.
- [11] PRESBY H M, EDWARDS C A. Near 100% efficient fibre micro-lenses [J]. Electron Lett, 1992, 28(6): 582~584.