

半导体激光器光波准直特性研究*

曾小东 于常青 詹玉书

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

摘 要 分析了半导体激光器光波经准直透镜的传输特性, 对影响准直光束质量的主要因素作了深入讨论, 并在实验上利用小口径大数值孔径透镜获得了高准直度的光束.

关键词 半导体激光器, 准直, 光传播.

1 引 言

光通信作为地球轨道卫星之间的通信以及无法铺设光纤场合的点对点通信, 是很有发展前途的. 由于光通信具有传输容量大、保密性好、不受电磁干扰等优点, 已日益受到人们的关注^[1, 2]. 卫星间的距离通常在数千公里乃至数万公里, 光束的准直特性至关重要, 因为接收点光功率密度的大小差不多是按光束发散角平方反比率关系迅速变化的. 在这种场合, 对于光束的准直特性不仅要在理论上准确估计, 实验装置也要精确调整. 半导体激光器(LD)作为一种小型高可靠性的光源, 由于近年来制造工艺水平的迅速提高和输出功率的不断增大, 已成为太空光通信的首选光源. 但半导体激光器因波导结构特点, 输出光波有很大发散角, 其远场光分布特性已不满足傍轴光学, 这给分析经透镜的传输规律以及设计光学系统带来麻烦. 按通常想法, 为了得到小发散角的光束, 应使用较大口径的光学系统, 但大口径透镜的焦距不能很短, 导致数值孔径太小. 而半导体激光器的发散角很大, 小数值孔径透镜能量损失太大, 因此要用更复杂的系统. 对长距离应用, 能量利用率是很重要的. 能否利用小口径大数值孔径的简单光学系统获取既有高的能量传输效率又能保证很小的光束发散角, 是一个很有应用价值的问题. 本文根据非傍轴远场光分布理论^[3], 深入分析了半导体激光器光波经透镜系统的准直特性, 以及影响准直特性的主要因素, 并给出 Melles Griot 公司的 06GLC001 和 06GLC002 组合透镜用于准直半导体激光器光波实验结果. 结果表明使用优良的小口径准直透镜, 可以获得优于 0.5 mrad 的光束发散角和大于 80% 的能量传输效率.

2 光波准直特性分析

半导体激光器输出光波的单色性较好, 因此透镜的色差可以不必考虑. 为了获取高质量的准直光束, 准直光学系统必须是球差、慧差、像散以及像场弯曲都经过精确修正的优良光

* 国家自然科学基金部分资助, 项目编号 69576021.

收稿日期: 1997-11-26; 收到修改稿日期: 1998-01-26

学系统. 这种系统可以看作是空间相位变换器, 可将透镜后焦点处发出的点源球面相位变换成平面相位, 而对振幅能无失真地传输. 假设半导体激光器的发光面位于透镜的后焦点, 则在透镜前形成一“类椭圆”光斑(指最大光强 1/2 处的轨迹), 其长、短半轴分别设为 a 及 b , 可由实验确定. 由于半导体激光器具有较大的发散角, 这种光场分布必须用非傍轴光学来描述. 经透镜变换后, 光束的准直性能已相当好, 可以采用傍轴近似下的传播理论加以描述.

在本文中, 光束发散角定义为: 在远场区垂直于光轴的平面上, 光强下降至最大值一半处的全张角. 按照参考文献[3], 半导体激光器在透镜前的光场相位分布是理想的球面波(这里未考虑半导体激光器本身的像散, 因半导体激光器的像散可用一弱柱面镜很好地矫正). 设半导体激光器的发光面位于透镜的后焦点处, 则经透镜变换后(即在透镜的出射表面处)的光场可表示为

$$u(x', y') = A \frac{f}{r^2} \frac{Dr^2}{Dr^2 + x'^2} \exp\left[-\frac{y'^2}{Cr^2}\right] \quad (1)$$

其中 D 、 C 、 A 是与波长以及半导体激光器波导结构有关而与透镜无关的常数, 可根据远场光强分布测量值来确定; $r = \sqrt{f^2 + x'^2 + y'^2}$ 是透镜出射面上任一点至半导体激光器的距离, 而 f 是透镜的焦距. 把光分布(1)式看作次级光源, 并将坐标原点固定在透镜出射面中心, 利用傍轴光传播公式(如文献[3]中(8)式, 只要令 $r = z$) 可得到准直场的远场分布为

$$E(x, y, z) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp(ikz)}{z} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x', y') \exp\left[-\frac{ik}{z}(xx' + yy')\right] dx' dy' \quad (2)$$

式中积分一般应遍及透镜的整个通光孔径. 因半导体激光器在平行于结平面的方向上(y 方向)发散角较小, 只要透镜的数值孔径 $NA > 0.2$ (对应的全收光角约 22°), 即可认为光波不受限制. 故在这个方向上可用自由高斯波计算远场发散角. 但在垂直于结平面的方向上(x 方向), 光波发散角很大, 即使 $NA = 0.6$, 光场仍受到透镜孔径的限制, 不能按不受限光波去计算. 为了计算 x -方向的发散角, 可在(2)式中令 $y = 0$, 然后代入 $I(x, z) = I(0, z)/2$, 并利用 $I = EE^*$, 可得

$$\int_0^{R/\Gamma} \frac{\cos k\Gamma(x/z)t}{1+t^2} dt = \sqrt{\frac{1}{2}} \arctan\left(\frac{R}{\Gamma}\right) \quad (3)$$

其中 R 为透镜半径, $\Gamma = Df^2/(1+D)$, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数. 由于远场发散角很小, x/z 就可以看成远场半发散角, 所以 $2x/z$ 就是远场全发散角. 对于给定的 R 和 f , 利用数值方法可以把(3)式中的 x/z 解出. 图 1 给出了 x 、 y 方向的发散角随透镜数值孔径 NA (半径/焦距)的变化关系, 图 2 给出了透镜传输效率与 NA 的关系以便综合比较, 其中光场分布参数 D 、 C 是以一个实际器件(日立公司的 HL6720G 半导体激光器)为例、透镜焦距 $f = 8 \text{ mm}$ 的情况计算的.

对于理想透镜系统, 由图 1、图 2 可得如下结论:

- 1) 小口径大数值孔径理想透镜可以兼顾发散角及传输效率两方面要求;
- 2) 当数值孔径 $NA > 0.2$ 以后, y 方向的远场发散角已不受 NA 影响, 稳定在 0.3 mrad ;
- 3) 当数值孔径 $NA > 0.5$ 以后, x 方向发散角的变化已不明显;
- 4) 数值孔径 $NA > 0.6$ 以后, 耦合效率可达 90% 以上.

由于 $NA > 0.65$ 以上的优质透镜组加工比较困难, 所以综合耦合效率和准直效果来看, NA 选在 $0.5 \sim 0.65$ 之间是适宜的.

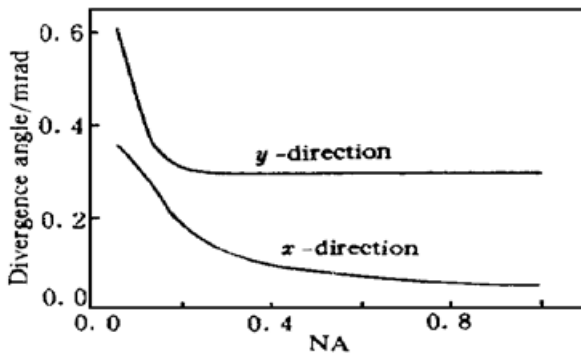


Fig. 1 Dependence of the divergence angle on NA of the lens

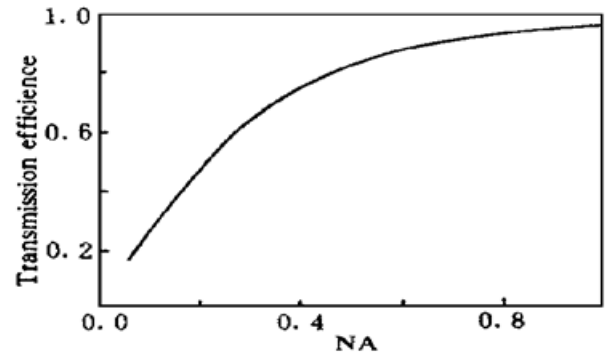


Fig. 2 Dependence of the transmission efficiency on NA of the lens

3 实验结果

Melles Griot 公司的 06GLC001~ 06GLC006 系列组合透镜是专为半导体激光器准直或聚焦而设计制造的. 球差、慧差、像散以及像场弯曲等像差是通过优化设计而在最大限度上给以修正, 均可达到衍射极限状态工作. 其中 06GLC001 是数值孔径最大的一种, 由 4 个透镜组成, 而 06GLC002 是由 3 个透镜组成. 06GLC001 和 06GLC002 的主要特性参数列于表 1.

Table 1. Main factors of the composited lens

product number	focal length/mm	NA	aperture/mm	wavefront distortion λ
06GLC001	6.5	0.615	8.0	1/4
06GLC002	8.0	0.500	8.0	1/4

其中波前畸变是指透镜的整体性能, 定义为在整个通光孔径内发生的最大波前误差与一个波长之比. 图 3 是实验装置示意图, 半导体激光器是日立公司的 HL7620G.

半导体激光器被固定在一个三维精密可调平台上, 在纵向(即光轴方向)应有 $0.1 \mu\text{m}$ 的调节精度. 在 27.5 m 远处用一光电探测器 PD 扫描记录光斑尺寸, 即可计算光束发散角. 实验结果见表 2.

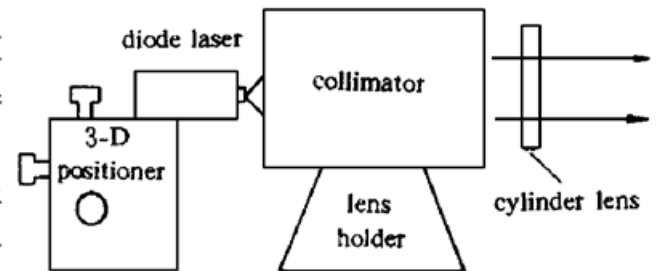


Fig. 3 Diagram of the experimental setup

Table 2. Experimental results

06GLC001			06GLC002		
θ_{\perp} /mrad	θ_{\parallel} /mrad	η	θ_{\perp} /mrad	θ_{\parallel} /mrad	η
0.35	0.59	0.90	0.29	0.51	0.83

由表 2 可见, 即使十分优良的透镜, 其准直场与理想透镜的结果仍有较大差距. 在 y 方向发散角的测量值 0.51 mrad (06GLC002) 与理论值差异不大, 因这个方向上半导体激光器发散角较小, 到达透镜时光能量集中在中心区域, 像差较小. 而在 x 方向, 半导体激光器光波发散角很大, 达到透镜时能量布满整个孔径, 而透镜边缘处像差较大, 所以计算值与实验结

果差异较大. 对此可作如下简单估计: 如在离轴心 3 mm 处有 $0.21 \mu\text{m}$ 波前畸变, 可产生 0.14 mrad 的光束发散角. 可见, 一般情况下准直特性不是由通光孔径造成的衍射所限, 而是由透镜像差所决定. 因此, 实际应用中不必追求大的口径. 实验中有几个问题须引起注意:

1) 大多数半导体激光器有一玻璃光窗, 约 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ 厚. 在大角度时引起的波前畸变对准直影响很大, 必须使用裸管芯, 本实验将 HL6720G 的管帽用车床去掉.

2) 半导体激光器的像散也应当消除, 否则两个方向不能同时得到最佳的准直特性. 可用一弱柱面镜(焦距约 $3000 \sim 4000 \text{ mm}$) 来矫正, 柱面镜应放在准直透镜之后. 由于半导体激光器特性一致性不好, 柱面镜曲率半径要由实验确定.

3) 半导体激光器的机械位置调整对准直场影响很大, 发散角对此极为敏感, 特别是在光轴方向的纵向变化. 管芯发光面相对于透镜焦点稍有偏移, 准直性能急剧恶化, 必须准确调整, 调好后的装置应避免振动.

结 论 理论分析和实验结果表明, 在对半导体激光器光波作准直时, 一般透镜的口径对准直场的影响不是很大, 透镜像差对准直场有很大影响, 必须使用大数值孔径优良透镜以兼顾准直和能量耦合两方面的要求. 实验结果获得了亚毫弧度发散角和大于 80% 的光能利用系数, 在实际通信系统中非常有用. 用它构成半导体激光器组件再经发射望远镜进一步准直, 就能获得远程通信所需的高功率和微弧度级发散角的准直光束.

参 考 文 献

- [1] Fitzmaurice M, Hayden W. Space laser communication transceiver. *Proc. SPIE*, 1991, **1417**: 13~ 21
- [2] Casey W L, Doughty G, Marsto R *et al.*. Design consideration for air-to-air laser communications. *Proc. SPIE*, 1991, **1417**: 89~ 98
- [3] Zeng X, Naqwi A. Far-field distribution of double-heterostructure diode laser beams. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(24): 4491~ 4494

Collimation of Semiconductor Laser Beams

Zeng Xiaodong Yu Changqing Zhan Yushu

(Department of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 26 November 1997; revised 26 January 1998)

Abstract The transmission properties of collimating lenses for semiconductor laser beams are analysed and the main factors to influence the beam quality of the collimated semiconductor laser beam are discussed. The highly collimated semiconductor laser beams are obtained by using the small aperture lenses with large numerical aperture.

Key words semiconductor laser, collimation, light propagation.