

文章编号: 1001-3806(2013)02-0191-04

一种可用于激光周视探测的发射光学系统设计

谢洪波 祝晓晨 吕二阳 李勇

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息工程系, 天津 300072)

摘要: 为了改善大功率半导体激光器快轴和慢轴两个方向光束质量极不均衡这一光束特性,基于几何光学的折射原理,经过理论分析和软件模拟实验设计了一套发射光学系统,采用柱面镜改变快轴和慢轴的发散度,使输出光束在子午方向上以窄视场发射,在弧矢方向上覆盖 $\pm 30^\circ$ 的视场,并加入特殊结构的棱镜混光,得到目标区域内能量分布均匀性大于75%的窄带状光束,能量利用率达80%以上。结果表明,单套发射系统可以完成工作距离15m以内的 $\pm 30^\circ$ 视场探测,6套发射系统构成 360° 视场完成周视探测。这一结果对于提高激光主动探测的精度和增大其使用范围是有帮助的。

关键词: 激光器; 几何光学; 窄带状光束; 柱面镜; 棱镜

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.013

An emitting optical system design for laser panorama detection

XIE Hong-bo, ZHU Xiao-chen, LÜ Er-yang, LI Yong

(Opto-electronics Information Engineering Department, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to improve the beam characteristics of high-power laser diode, whose beam quality is quite different in fast axis and slow axis, a set of emitting shaping system was designed through theoretical analysis and software simulation based on geometrical optics of refraction. As beam divergence of fast axis and slow axis is changed by cylindrical lens separately, the beams radiate in the meridional direction to the narrow field of view, and cover the field of view of $\pm 30^\circ$ in the sagittal direction. Meanwhile, a prism of special structure was added in the shaping system to mix light. Consequently, the uniformity of energy distribution of the output beam became greater than 75% within the target area, and the energy utilization rate reached to 80% or more. The results show that a single emitting system can complete the detection of $\pm 30^\circ$ field of view within the work distance of 15m, and six emission systems constitute a 360° field of view to complete panorama detection. This result is helpful for improving the accuracy of the laser active detection and increasing its scope.

Key words: lasers; geometrical optics; narrow-band shaped beam; cylindrical lens; prism

引言

随着激光器件的迅速发展,激光技术在军事以及民用的各个领域应用也越来越广泛,特别是在军事中,很多情况下把激光当作一种探测手段。激光探测是通过发射系统不断地向目标发射连续或脉冲的激光光束,利用接收系统接收目标反射的回波光束,通过分析回波所携带的信息,提取出所需要的目标特征。发射光学系统作为激光探测的重要组成部分,决定了探测的视场范围,其出光均匀性为精确探测提供了有效的技术基础。

半导体激光器及其阵列在应用中突出的缺点是快

慢轴两个方向的光束质量^[1]极不均衡和发光单元在空间上排列不集中造成的亮度不均匀。此外,光源本身中心能量高边缘能量低的近似高斯分布^[2]形式也限制了其应用范围。因此,发射光学系统对半导体激光器的整形设计显得尤为重要。由于半导体激光器的发散角在快轴和慢轴方向上的非对称性,用常规的球面对称光学系统难以得到具有特定视场且能量均匀分布的光束。因此,本文中采用柱面镜对快轴光束准直,对慢轴光束增加其发散度^[3],并加入特殊设计的棱镜混光,通过实例设计,给出一种针对半导体激光器阵列整形的非对称光学系统的设计思路。

1 光源模型

半导体激光器阵列由16个周期性排列的发光单元组成,单个发光单元在快轴方向上的几何尺寸为 $1\mu\text{m}$,发散角为 30° ,在慢轴方向上的几何尺寸为 $120\mu\text{m}$,发散角为 12° ,并沿慢轴彼此间隔排列,整个发

作者简介: 谢洪波(1969-),男,博士,副教授,主要从事光学成像与显示技术方面的研究。

E-mail: hbxie@tju.edu.cn

收稿日期: 2012-07-06; 收到修改稿日期: 2012-07-24

光区的尺寸为 $1\mu\text{m} \times 3.64\text{mm}$ 。发光单元的排列形式如图 1 所示。

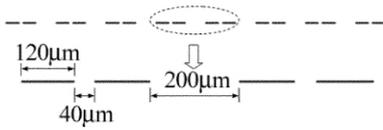


Fig. 1 Light emitting structure diagram of laser diode

半导体激光器输出的光波在平行于结平面方向为厄米-高斯模式,在垂直于结平面方向为基模高斯模式,单个激光二极管发出的光在横截面上呈椭圆形。用厄米-高斯 TEM_{m0} 混合模来模拟半导体激光光束,设 $z=0$ 平面上的 TEM_{m0} 模 ($m=0,1,2,\dots$) 的光场分布 $E_{m0}(x,y,z)$ 为^[4]:

$$E_{m0}(x,y,z) = E_m(x,\rho) E_0(y,\rho) \quad (1)$$

其中:

$$E_m(x,\rho) = A_m H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{w_{0x}}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{w_{0x}^2}\right) \quad (2)$$

$$E_0(y,\rho) = A_0 \exp\left(-\frac{y^2}{w_{0y}^2}\right) \quad (3)$$

式中 x 轴平行于 p-n 结 A 为场振幅 m 是半导体激光多模运行时的模阶次, $H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{w_{0x}}\right)$ 为 m 阶厄米多项式, w_{0x} 和 w_{0y} 分别为基模高斯光束在 x 和 y 方向的束腰半径,由于发光单元之间的相位耦合,整个阵列发出的光束是相干或部分相干的^[4]。光学仿真分析软件 TracePro 提供了栅格式光线追迹的方式,通过光束设置可以模拟高斯光束的传播^[5-6],假定高斯光束的束腰在激光二极管的出射端面处,距离发光面 15m 时光斑能量分布如图 2 所示。

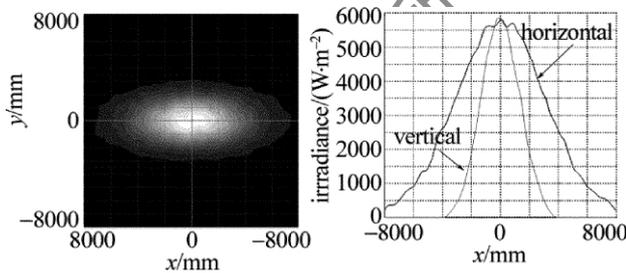


Fig. 2 Simulation of laser diode array

水平方向对应快轴,竖直方向对应慢轴,由图 2 可看出,未经整形的激光二极管阵列光束质量很差、功率密度低。

2 光学系统设计

激光探测系统由 6 套发射光学系统组成,单个发射系统负责 60° 的探测视场,实现完全覆盖 360° 探测,见图 3。为了提高探测的可靠作用和抗干扰能力,发射系统的子午方向应该以窄视场发射,发散角控制在 $\pm 1^\circ$ 左右,弧矢方向则覆盖 $\pm 30^\circ$ 以内的视场,且角度

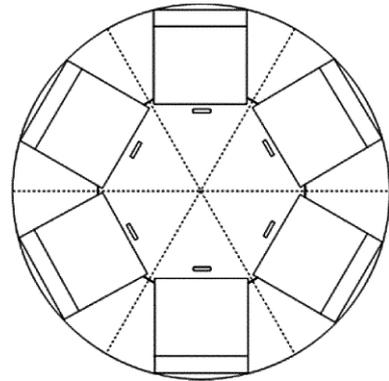


Fig. 3 360° detection range covered by six emitting systems

连续变化,以解决探测盲点问题。

要在弧矢和子午方向上得到不同视场的出射光束,光学系统须在两个方向上有不同的焦距和放大率,显然,传统的球面对称系统不能满足这样的要求。因此,考虑使用变形光学系统,在弧矢和子午平面内有不同的放大倍率,通常使用柱面镜或棱镜。

2.1 快轴准直

为了改变激光束的发射视场,使其成为一个能量集中的窄带状光束,需要对一个方向角度压缩准直,对另一个方向角度发散扩束。考虑到空间有限,整个光学系统的机械尺寸不宜过大,因此,首先对快轴方向角度进行压缩准直。一般的气体或者固体激光器自身的发散角较小,可使用单透镜对激光光束进行准直^[7]。但对发散角较大的半导体激光器来说,准直系统的数值孔径较大,一般数值孔径 $d_{NA} = 0.2 \sim 0.3$,而且焦距很短,难以确保良好的像差补偿^[8]。故本设计中采用两片双凸柱面镜,使用高折射率的玻璃材料 ZF_{13} ,当入射激光光束的束腰位于组合透镜系统的前焦面上时,可得到很好的准直效果。结构如图 4a 所示,左边第 1 片为半导体激光器的玻璃封装,设计时应考虑其对系统的影响。

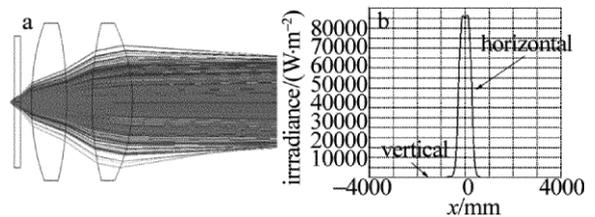


Fig. 4 Beam of fast axis collimated by the cylindrical lens and energy distribution

快轴方向经柱面镜压缩准直后,光斑尺寸明显变小,能量分布很集中。在距离系统 15m 的目标处形成的光斑直径为:

$$D = 2l' \tan u' = 2 \times 15000 \times 0.0174 = 522\text{mm} \quad (4)$$

式中 l' 为工作距离, u' 为光束通过柱面镜之后的发散角。此直径范围内的光斑能量占总能量的 98%。能量分布如图 4b 所示。

2.2 慢轴扩束和棱镜混光

对慢轴方向的光束来说,前面两片柱面镜相当于平行平板,通过后只是增加了光程,角度不发生变化。同样使用两片凹柱面镜^[6-7]增加慢轴方向光束的发散度,结构如图 5a 所示。

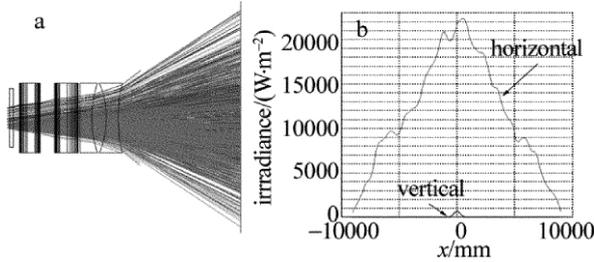


Fig. 5 Beam of slow axis expanded by the cylindrical lens and energy distribution

在距离系统 15m 的目标处形成的光斑直径为:

$$D = 2l \tan u' = 2 \times 15000 \times 0.577 = 17310\text{mm} \quad (5)$$

此直径范围内的光斑能量占总能量的 96.9%, 能量分布见图 5b。

经负透镜发散后,出射光束虽然覆盖了 $\pm 30^\circ$ 的视场,但是其能量分布仍然是中心高边缘低的形式,且边缘和中心相差很大,边缘能量低的区域会造成回波接收的信号较弱,淹没在环境噪声里,探测不到目标物体。由此,考虑在系统中加入棱镜偏折光线,使中心和边缘的光线有不同的扩束比,并且中心能量高的光束其发散程度大于边缘能量较低的光束,这样,中心光束由于负透镜的发散作用叠加到边缘区域,经过棱镜折射的发散程度小的光束在空间上补偿目标上能量低的区域,从而使整个目标区域达到相对均匀。基于这个思想,将前一片负透镜改成棱镜与柱面镜相结合的形式,如图 6 所示,五边形棱镜的直角边与柱面镜胶合,在光线的出射面形成一个拼接的异形面。

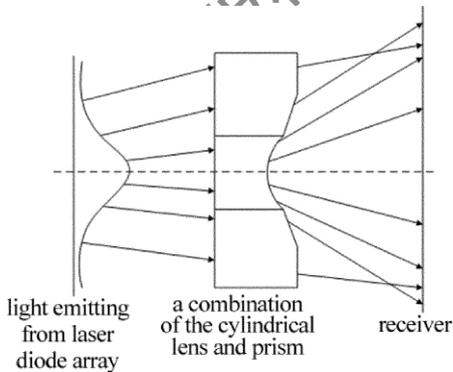


Fig. 6 Light through a combination of cylindrical lens and prism

当光束只通过中间的柱面镜时,中心光束向两边叠加,形成两个波峰,中间波谷的高度由柱面镜的曲率半径决定。假设图 7 中的能量分布曲线与水平坐标轴所包围的区域面积为 S ,与水平坐标轴上对应的光斑宽度 L 的比值即光斑能量均匀分布时所对应的能量数

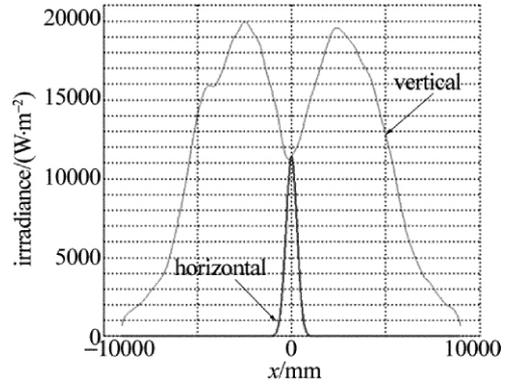


Fig. 7 Energy distribution curve of the light passing through the middle cylindrical lens

值 E_0 , 调整柱面镜的曲率半径使波谷的高度接近 E_0 , 如图 7 所示,两个波峰处的能量再通过棱镜的折射作用继续向边缘叠加。

设棱镜的顶角为 α , 入射角 θ_1 为入射光线与水平方向的夹角,出射角 θ_4 为经棱镜斜边出射的光线与斜边法线的夹角,出射光线与水平方向的夹角为 θ 。棱镜对光线的偏折如图 8 所示。

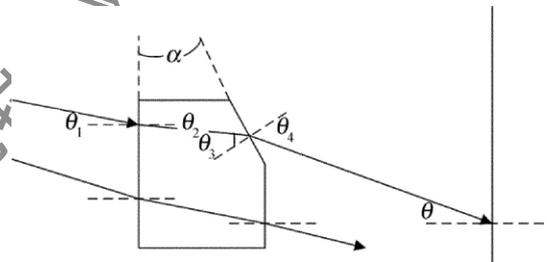


Fig. 8 Light refracted by a trapezoidal prism

根据折射原理:

$$\begin{cases} \sin\theta_1 = n\sin\theta_2 \\ \theta_3 = \theta_2 + \alpha \\ n\sin\theta_3 = \sin\theta_4 \end{cases} \quad (6)$$

整理得:

$$\theta_4 = \arcsin\left[n\sin\left(\alpha + \arcsin\frac{\sin\theta_1}{n}\right) \right] \quad (7)$$

由几何角度关系: $\theta = \theta_4 - \alpha$ 。

常用的棱镜材料为 K9,从可见光到近红外都有良好的透过率,折射率 $n = 1.52$,入射角 θ_1 取 $0^\circ \sim 6^\circ$,为了避免全反射,进入棱镜的光线在斜边上的入射角 θ_3 应小于临界角 C (约为 41°),从而得到棱镜顶角 α 的取值范围 $0^\circ \sim 37^\circ$,经计算,出射光线与水平方向的夹角 θ 在 $0^\circ \sim 46^\circ$ 内连续变化,且随棱镜的顶角 α 增大而增大。在软件中模拟 α 取不同值的情况:随 α 增大,波峰逐渐向两边移动,且峰值逐渐减小;当 $\alpha = 25^\circ$ 时, $\theta = 15^\circ \sim 22^\circ$,能量均匀性由公式^[9] $\frac{E_{\max} - E_{\min}}{(E_{\max} + E_{\min})/2}$ 计算为 78%,直径范围内的光斑能量占总能量的 87%,同时兼顾子午方向的能量利用率,得出系统总的能量

利用率为 85.26% ,能量分布曲线如图 9 所示;当 $\alpha > 25^\circ$ 时,虽然能量均匀性仍在 70% 以上,但 $\pm 30^\circ$ 视场以内的能量利用率下降。

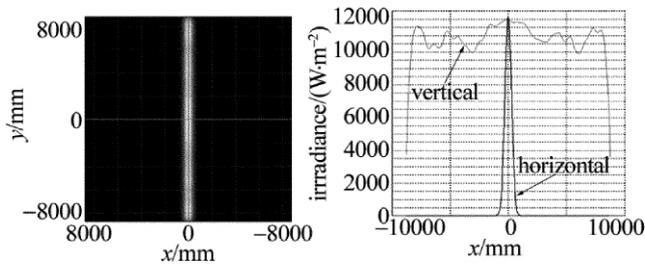


Fig. 9 Energy distribution of slow axis after expansion

3 结论

所设计的发射光学系统采用柱面镜改变激光二极管阵列快轴和慢轴的发散度,并加入特殊结构的棱镜混光,得到在弧矢方向上能量均匀分布窄带状光束,覆盖 $\pm 30^\circ$ 的视场。6套系统构成 360° 的视场,完成空间周视探测,并且弧矢方向上角度连续变化,探测中的盲点问题得以解决。值得注意的是,柱面镜属于非旋转对称系统,在使用中有严格的方向性,当激光二极管阵列的快慢轴与其对应的柱面镜的母线平行时才能到达预期的整形效果,因此,本发射系统对机械装配有较高的要求。

参考文献

- [1] PENG H Y, GU Y Y, SHAN X N, *et al.* Study on beam shaping of high power laser diode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(2): 1-6(in Chinese).
- [2] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN Y R, *et al.* Laser principles[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 70-74, 305-332(in Chinese).
- [3] SMITH W J. Modern optical engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 260-264(in Chinese).
- [4] LI B Zh, ZENG L Z, XUE J H. Study on beam quality and astigmatic characteristics of laser diode [J]. Journal of Guizhou University, 2004, 21(3): 268-270(in Chinese).
- [5] COLUCELLI N. Nonsequential modeling of laser diode stacks using Zemax: simulation, optimization, and experimental validation [J]. Applied Optics, 2010, 49(22): 4237-4245.
- [6] LAVELLE J, O'SULLIVAN C. Beam shaping using Gaussian beam modes[J]. Journal of the Optical Society of America, 2010, 27(2): 350-357.
- [7] XIAO Z X. Engineering optical design[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2008: 168-180(in Chinese).
- [8] ZHENG P, YANG Y P, TAO Y, *et al.* Design of two-level laser beam expander based on Galilean structure [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(3): 347-350(in Chinese).
- [9] DU G Sh, BU Y H, XUE Ch J, *et al.* High power semiconductor laser combined source with good spot uniformity[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(3): 574-578(in Chinese).