

文章编号: 1001-3806(2005)04-0433-04

面阵半导体激光器的耦合理论设计

张 彪, 陈 豫, 李 港*

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘要: 用光线追迹方法计算了面阵半导体激光器的光束在透镜导管内传播及分布情况。理论给出了设计透镜导管时主要考虑的参数及其选取原则, 在输出平面上得到了近高斯分布的激光输出。理论表明, 利用透镜导管对面阵半导体激光器进行耦合能够获得高功率密度的光束输出, 这种方法将是今后高功率全固态激光器耦合系统的主要耦合方法。

关键词: 透镜导管; 耦合系统; 光线追迹; 端面抽运

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

The coupling-theory-design of the high-power semiconductor lasers

ZHANG Biao, CHEN Meng, LI Gang

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022 China)

Abstract Based on ray-tracing the transmitted and distributed ways of the beams of the semiconductor lasers were gained. The theory indicates how to select the main parameters in designing lens duct to obtain the approximated Gaussian mode light from the output face. The theory shows that high-power density beams can be obtained with lens duct in coupling high-power semiconductor lasers, and this coupling method would be the main one in coupling systems of the all solid state lasers in the future.

Key words lens duct coupling system; ray-tracing end-pumped

引 言

半导体激光器的体积小、重量轻、光束能量集中、高寿命、高可靠性、高重复率、高效率 and 结构紧凑等特点使其成为固体激光器的主要抽运源。一般面阵半导体激光器由一个或多个二极管线阵 (bar) 组成, bar 的典型发光孔径为 $10\text{mm} \times 1\mu\text{m}$, 发散角在垂直结平面方向约为 40° (FWHM), 在结平面方向约为 10° (FWHM)。

用单个二极管线阵端面抽运激光介质时, 通常有自聚焦透镜耦合^[1]、光纤耦合^[2]、多透镜组合耦合、多棱镜列阵耦合^[3]、双平面镜耦合^[4]、微台阶反射镜耦合^[5]、微片棱镜堆耦合^[6]等耦合方式, 这些耦合方式由于各自的特点得到不同的应用。

对于半导体激光器面阵 (stack) 的耦合, 可以采用组合透镜的耦合方式, 但耦合系统比较复杂, 由于各个透镜的损耗及像差的影响会造成耦合和抽运效率都不高。一种新型的非成像光学元件——透镜导管作为耦合系统可以比较好地解决这个问题。透镜导管由于具

有结构简单、传输效率高、易于加工调试、成本低、有利于与激光模式匹配的正方形输出面等特点而倍受大家的青睐^[7-8]。

由于半导体激光器在快轴方向上具有较大的发散角, 通常须用柱透镜先对其进行压缩 (一般约 40° 的发散角可压缩到几度), 然后再由透镜导管耦合到激光介质中。

傅汝廉等^[9]给出的光线在侧壁反射角的计算方法不理想, 光线轨迹的计算方法存在不足。作者在此基础上, 更详细地分析了光线在透镜导管内的传播规律 (保证光线在侧壁发生全反射), 提出了更为合理的光线传播轨迹计算方法 (推广到多个反射点的情况), 同时考虑到出射面上由玻璃到空气折射率变化的光线分布图 (傅汝廉等人^[9]没有考虑此问题), 并详细讨论了各个主要参数对输出光束分布的影响, 从而得到具有最佳耦合效果的透镜导管参数及光线分布图。

1 透镜导管简介及设计

透镜导管的结构如图 1 所示。其材料可以根据不同的需要选择合适的光学玻璃。其输入面为球面 (如有特殊需要可以在两个相互垂直的平面内选用不同的曲率半径), 侧面和输出面均为平面。它主要靠入射球面的会聚和侧面的全反射将入射光线收集到输出面输出。

作者简介: 张 彪 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器的耦合研究。

* 通讯联系人。E-mail: lig@bjut.edu.cn

收稿日期: 2004-05-24 收到修改稿日期: 2004-06-23

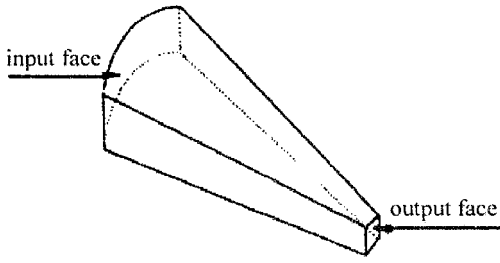


Fig 1 Schematic diagram of the lens duct

一般说来,球面的入射表面所决定的焦距为 $f = r \times n(n-1)$, 其中, r 为球面的曲率半径, n 为透镜导管材料的折射率。据 BEACH 报道^[10], 在实际情况下, 透镜导管的最佳长度为 $l = 0.92 \times f$ 。作者认为其最佳长度应由实际的设计要求而定。

理论分析表明: 透镜导管输入面的曲率半径、半导体激光器出射光线的发散角、导管的长度以及输出端端面的尺寸都对输出光束的分布有很大的影响。下面给出设计的具体思路和方法。

透镜导管对光线折射和反射的光路图如图 2 所示。将输入面的球心定为坐标原点, 点 (x_0, y_0) 为半导体激光器上的某一发光点。计算中的角度规定: 光线与坐标轴的夹角由坐标轴算起, 入射角、折射角由光线算起, 法线与坐标轴的夹角由坐标轴算起, 顺时针方向形成的锐角为正值、反之为负值。半导体激光器的发光区宽为 h_{LD} , 透镜导管入射端、出射端的宽度分别为 h_1, h_2 , 长为 l

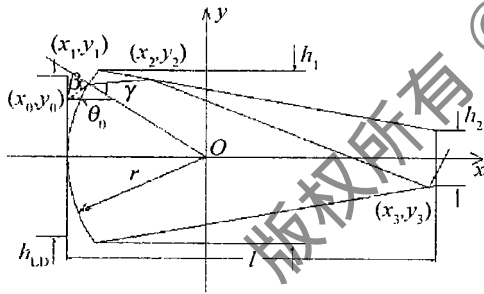


Fig 2 Schematic diagram of ray-tracing and the parameters of lens duct

由发光点 (x_0, y_0) 出射的与 x 轴夹角为 θ_0 的光线, 对应球面上的入射点 (x_1, y_1) 由以下两式决定:

$$y_1 - y_0 = \tan(-\theta_0)(x_1 - x_0) \quad (1)$$

$$x_1^2 + y_1^2 = r^2 \quad (2)$$

式中, r 为透镜导管输入面的曲率半径。

通过球面的光线满足折射定律: $n \sin \gamma = \sin \beta$ (3) 式中, 入射角 $\beta = -\theta_0 + \arcsin(y_1/r)$, γ 为折射角, n 为球面介质材料的折射率。

透镜导管内部的折射光线与侧壁的交点依次为 $(x_i, y_i), i = 2, 3, 4, \dots$ 。由 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots)$ 出射的光线与 x 轴的夹角分别为 θ_i , 则 (x_1, y_1) 与 x 轴的夹角 $\theta_1 = \arcsin(y_1/r) - \gamma_0$ 。以上各反射点分别由以下的方程组决定: $y_{i+1} - y_i = (x_{i+1} - x_i) \tan(-\theta_i)$ (4)

$$\frac{|y_{i+1} - y_i| - h_1/2}{x_{i+1} + \sqrt{r^2 - (h_1/2)^2}} = \frac{h_1/2 - h_2/2}{-\sqrt{r^2 - (h_1/2)^2} - (l - r)} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \theta_i = (-1)^{i-1} \theta_1 + 2(-1)^i (i-1) \alpha & y_2 > 0 \\ \theta_i = (-1)^{i-1} \theta_1 + 2(-1)^{i+1} (i-1) \alpha & y_2 < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots$, α 为透镜导管侧壁的倾角, 满足:

$$\tan \alpha = \frac{h_1 - h_2}{2(l - r) + \sqrt{4r^2 - h_1^2}} \quad (7)$$

由以上几式可得到各条光线在透镜导管内的各个反射点的坐标值, 从而得到光线在透镜导管内的传播轨迹。即半导体激光器发射对应角度的光线经耦合系统后, 就能找到它在输出端面上的对应点。这样就可以计算某一平面上的光强, 以便优化波导耦合系统的参数。

要得到高效率的半导体激光的耦合输出, 必须保证光线在透镜导管侧壁的入射角大于全反射角, 而在透镜导管输出端入射角小于全反射角。

(1) 光线首先由透镜导管的上半部分反射, 且由上半部分出射, 则在侧壁上各反射点的入射角为:

$$\varphi_i = \pi/2 - \theta_i + (2i - 3) \alpha \quad (8)$$

式中, i 为大于等于 2 的偶数。

(2) 光线首先由透镜导管的上半部分反射, 而由下半部分出射, 则在侧壁上各反射点的入射角为:

$$\varphi_i = \pi/2 - \theta_i - (2i - 1) \alpha \quad (9)$$

式中, i 为大于 1 的奇数。

由于对称性, 光线首先由透镜导管的下半部分反射的情况与上半部分反射的情况相同。

假设由 (x_1, y_1) 出射的与 x 轴夹角为 θ_1 的光线在透镜导管中能够进行 k 次全反射, 则满足条件:

$$\varphi_i > \arcsin(1/n) \quad (10)$$

(8) 式中 i 的值越大, φ_i 越大, 故只要 $\varphi_2 > \arcsin(1/n)$ 即可; (9) 式中 i 的值越大, φ_i 越小, 要满足 (10) 式, 须 $\pi/2 - \theta_1 - (2i - 1) \alpha > \arcsin(1/n)$, 要保证所有的光线都能全反射, θ_1 应取最大值, 而当 θ_1 取最大值 (相应的 θ_0 也取最大值) 时, 可确定光线在透镜中的最多反射次数 k 。

由 (6) 式可知, 光线在透镜导管中的反射次数越多, 反射光线与 x 轴的夹角越大, 所以, 出射光线的最大发散角与光线的反射次数有关, 而边缘光线的反射次数最多, 故当 θ_1, α 以及最多反射次数 k 确定后, 光线在透镜导管中最大的发散角 Ψ 也就确定了 (可以由 (6) 式求出), 由出射面出射后的发散角为 Ψ , 满足 $\sin(\Psi/2) = n \sin(\varphi/2)$ 。

通过以上的分析, 在保证光线满足全反射的条件下, 通过计算机处理以上的数据可得到光线在透镜导

管内的传播图(见图 3)。由于许多光线在透镜导管出射端的入射角非常大,所以,必须考虑到输出折射面两侧折射率变化的影响。

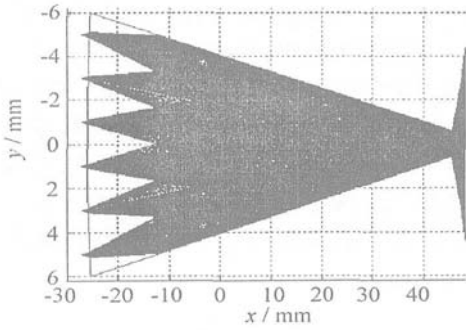


Fig 3 The distribution of the rays in lens duct and out of lens duct

采用的半导体激光器面阵由 4 个 40W bar 构成,每个 bar 长 10mm(慢轴方向),间隔为 1.8mm,在慢轴平面内的发散角为 10° ,快轴平面内发散角经柱面透镜压缩到 3° 。

由于距出射面一定距离的平面上的光线的分布情况主要受输入端球面的曲率半径、输出端端面的尺寸、半导体激光器的发散角以及所求平面距输出端距离的影响,所以,设计透镜导管时应综合考虑它们的影响,才能得到高质量的耦合光输出。在半导体激光器输出光功率一定的情况下,出射面的尺寸越小,得到输出光的光功率密度越大,所以在满足全反射的条件下,应尽量减小出射面的尺寸,获得高功率密度的光输出,为抽运大功率的固体激光器提供高质量的抽运源。

下面分别讨论以下几个参数对获得最小的输出面尺寸的影响。

在讨论之前,先假设透镜的长度按公式 $f = r \times n / (n - 1)$ 计算,假设输出面的尺寸为 h_2 ,而由于考虑到光线在透镜内是否能够发生全反射以及光线能否在出射面上的出射问题,实际的输出面的尺寸为 h_{out} ,然后根据 h_{out} 即可计算出透镜导管的实际长度。

(1) 半导体激光器的发散角 θ_0 的影响。发散角 θ_0 是半导体激光器本身固有的参数。为了获得较高的耦合效率,最小的 h_{out} 必须保证每一条光线都能在

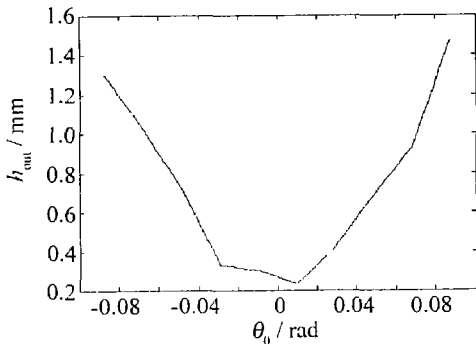


Fig 4 The variant relation of the h_{out} followed the angle of divergence θ_0 ($x_0 = -27\text{mm}$, $y_0 = 5\text{mm}$, $r = 26.5\text{mm}$, $h_2 = 0.3\text{mm}$)

透镜侧壁发生全反射并且在出射端不发生全反射。 h_{out} 随 θ_0 的变化曲线见图 4,由图 4 可知,在计算能够获得的最小 h_{out} 时,发散角一般取最大值。

(2) 入射球面的曲率半径 r 的影响。入射面的曲率半径对 h_{out} 的影响变化见图 5。由图 5 可知,所能达到的实际输出 h_{out} 随着球面的曲率半径 r 的增大而呈周期性的变化,要获得更小 h_{out} ,必须选择合适的球面的曲率半径 r 。

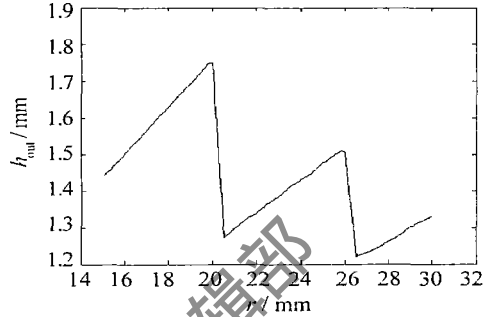


Fig 5 The variant relation of the h_{out} followed the radius of curvature r of the input face ($x_0 = -27\text{mm}$, $y_0 = 5\text{mm}$, $\theta_0 = 10^\circ$, $h_2 = 0.6\text{mm}$)

(3) 假想的出射尺寸 h_2 的影响。 h_{out} 随假想的出射尺寸 h_2 的变化关系见图 6。由图 6 可知,必须选择合适假想的出射尺寸 h_2 才能获得较小实际的出射尺寸 h_{out} 。

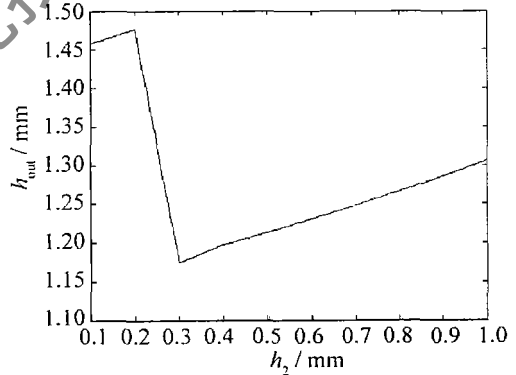


Fig 6 The variant relation of the followed the h_{out} fictitious input face h_2 ($x_0 = -27\text{mm}$, $y_0 = 5\text{mm}$, $\theta_0 = 10^\circ$, $r = 27\text{mm}$)

(4) 发光点位置的影响。发光点的位置也是半导体激光器本身固有的参数。为了获得较高的耦合效

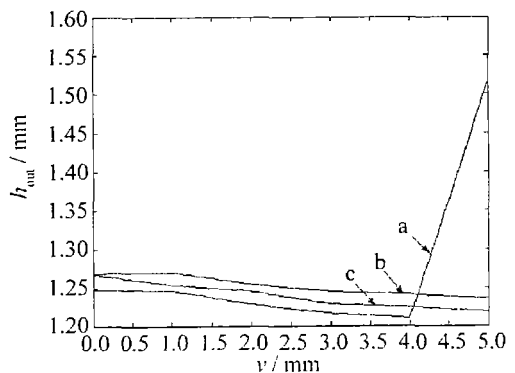


Fig 7 The variant relation of the h_{out} followed the position of the point of the light a— $x_0 = -27\text{mm}$, $\theta_0 = 10^\circ$, $r = 26.5\text{mm}$, $h_2 = 0.5\text{mm}$ b— $x_0 = -27\text{mm}$, $\theta_0 = 10^\circ$, $r = 26.7\text{mm}$, $h_2 = 0.65\text{mm}$ c— $x_0 = -27\text{mm}$, $\theta_0 = 10^\circ$, $r = 26.5\text{mm}$, $h_2 = 0.6\text{mm}$

率,最小的 h_{out} 必须保证每一发光点的光线都能在透镜侧壁发生全反射并且由出射端出射。发光点位置对 h_{out} 的影响见图 7。由图 7 可知,能够获得的最小 h_{out} 与前面讨论的几个参数有很大的关系。

由上图可以看出,由于发光点的位置不同,所能够获得的最小 h_{out} 也不同。即使发光点的位置相同,由于其它参数的不同所能够获得的最小 h_{out} 也不同。

在综合考虑以上几个参数共同作用的情况下,按照 h_{out} 保证所有发光点位置及所有发散角的光线都能在输出面出射的原则,得到在球面的曲率半径为 26mm 时,能够获得最小的实际输出平面的尺寸 $h_{out} = 1.2\text{mm}$,此时透镜的长度为 71.5mm。出射端最大发散角为 $2.1422\text{rad}(122.8^\circ)$ 。

在距透镜导管输出面不同距离的截面上光密度分布有着很大的不同(见图 8)。由图 8 可以看出,在距透镜导管端面距离大于一定的值后,光密度分布为近高斯分布,而在距离为 0.3mm 时,在输出平面中心光密度达到最高,从而在中心能够获得最高的功率密度,有利于抽运高功率固体激光器。

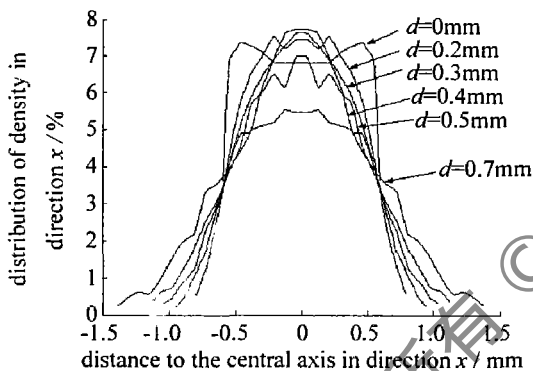


Fig 8 The different density-distributions of beams on the different distance between the faces with the lens duct in direction of the slow axes

2 结论及讨论

在理论设计中,半导体激光器与透镜导管的距离

(上接第 403 页)

行观测,频谱分布如图 5b 所示,显然为一维谱点阵,谱点坐标值与理论分析一致。图 5d 为 CCD 记录的图 5c 的傅里叶变换频谱分布。

3 小结

理论分析和实验结果表明:用共轭参考光照射,利用全息透镜可以方便地实现物体的傅里叶变换。(5)式表明,长焦距的全息透镜,小尺寸的输入图像产生的误差比较小。全息透镜可自行在实验室制作,方便易得、成本低廉,为物体傅里叶变换提供了一种灵活方便的方法。

对实际的输出尺寸 h_{out} 几乎没有什么影响,所以,只要保证入射的光线都能入射到透镜导管里面就可以了;半导体激光器的光束发散角越小,最后出射时光束的方向性越好,为得到高功率密度的耦合光输出,快轴方向的光束发散角压缩得越小越好。

利用透镜导管对半导体激光器面阵进行耦合是今后获得大功率半导体抽运光的主要手段,这种方法能够使多束抽运光叠加成较均匀的抽运光,且对抽运光有较高的耦合效率。但由于耦合后光束的发散角较大,所以,适合抽运那些对抽运光有较高的吸收系数的激光工作物质。

参考文献

- [1] YAMAGUCHI S, MA I H. Efficient Nd:YAG laser end-pumped by a 1 cm aperture laser diode bar with a GRN lens array coupling [J]. IEEE J Q E, 1992, 28(4): 1101~1105.
- [2] ZBNDEN H, BALMER J E. Q-switched Nd:YAG laser end pumped by a diode laser bar [J]. Opt Lett 1990, 15(18): 1014~1016.
- [3] YAMAGUCHI S, KOBAYASIT, SA ITO Y *et al*. Collimation of emissions from a high-power multistripe laser diode bar with multiprism array coupling and focusing to a small spot [J]. Opt Lett 1995, 20(8): 898~900.
- [4] GLARKSON W A, HANNA D C. Two minor beam-shaping technique for high-power diode bars [J]. Opt Lett 1996, 21(6): 375~377.
- [5] MARX B R. Beam shaping improves fiber coupling efficiency [J]. Laser Focus World 1998, 34(5): 32.
- [6] 石 鹏, 李小莉, 张贵芬 *et al*. 大功率激光二极管的微片棱镜堆光束整形和光纤耦合输出 [J]. 光学学报, 2000, 20(11): 1544~1547.
- [7] HONEA E C, BEACH R J SUTTON S B *et al*. 115W Tm:YAG diode-pumped solid-state laser [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(9): 1592~1560.
- [8] BEACH R J REICHER P, BENETT W *et al*. Scalable diode-end-pumping technology applied to a 100mJ Q-switched Nd³⁺:YLF laser oscillator [J]. Opt Lett 1993, 18(16): 1236~1238.
- [9] 傅汝廉, 王广军, 张凌倩 *et al*. 全固化激光器中的耦合系统一透镜导管的简化设计 [J]. 光子·激光, 1998, 9(2): 96~99.
- [10] BEACH R J Theory and optimization of lens ducts [J]. Appl Opt 1996, 35(12): 2005~2015.

参考文献

- [1] 赵学山, 张以谟. 用全息透镜组成傅里叶变换系统 [J]. 光学学报, 1983, 3(5): 410~414.
- [2] 黄奇忠, 杜惊雷, 张怡霄 *et al*. 用全息透镜实现分数傅里叶变换 [J]. 四川大学学报, 1999, 36(5): 892~895.
- [3] 郭永康, 黄奇忠, 杜惊雷 *et al*. 用全息元件实现变形分数傅里叶变换 [J]. 中国激光, 2000, 27(8): 719~723.
- [4] RICHTER A K, CARLSON F P. Holographically generated lens [J]. Appl Opt 1974, 13(12): 2924~2930.
- [5] AM IIA I Y, FR ESEM A A. Recursive design techniques for Fourier transform holographic lenses [J]. Opt Engng 1987, 26(8): 1133~1139.
- [6] BURALL D A, MORRIS G M. Design of a wide diffractive landscape lens [J]. Appl Opt 1989, 28(10): 3950~3959.
- [7] 吕乃光. 傅里叶光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998, 92~102.