

文章编号: 1001-3806(2011)06-0824-04

半导体激光器阵列耦合系统透镜导管的效率研究

商继敏^{1,2}, 朱伟¹

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071; 2. 郑州轻工业学院 技术物理系, 郑州 450002)

摘要: 为了将透镜导管应用于激光二极管阵列耦合系统, 利用镜像法得到了耦合效率与透镜导管参量之间的关系, 即透镜导管长度、曲率半径、输出面边长和快轴发散角均影响透镜导管耦合效率; 分析了不同尺寸的半导体激光器面阵耦合到不同尺寸的激光棒中的耦合效率。结果表明, 半导体激光器阵列及激光棒的尺寸对耦合效率有一定影响。所得结论为透镜导管的设计提供了一定的理论指导。

关键词: 激光器; 激光二极管阵列; 透镜导管; 镜像法; 耦合效率

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.027

Research of efficiency of lens duct for laser diode array coupling

SHANG Ji-min^{1,2}, ZHU Wei¹

(1. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. School of Technical Physics, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to adopt lens ducts in a coupling system for laser diode array (LDA), the function of the coupling efficiency with the parameters of the lens duct, such as the radius of curvature, the length of the lens duct, the side length of the output face and the fast axis divergence angle was obtained based on mirror-image method. The coupling efficiency of different size of LDA coupling into the laser rod was analyzed. The results are important in designing lens duct for LDA.

Key words: lasers; laser diode array; lens duct; mirror-image method; coupling efficiency

引言

大功率堆积式半导体激光器阵列 (laser diode arrays, LDA) 由于输出光斑尺寸非常大, 一般常用的光束耦合方法无法满足它的要求, 关于多个 bar 组成的面阵 LDA 的单耦合器件仅有透镜导管^[1-5]和空心导管^[6-7]的研究已有报道。空心透镜导管的工作方式与实心透镜导管基本一致, 二者的区别一个是由实心玻璃组成, 在透镜内部利用的是内全反射条件传输光线, 另一个是由镀全反膜玻璃板拼接组成, 在透镜内部光线传输利用的是镀反射膜。但是镀膜是空心透镜导管一个很重要的缺点, 对于一定角度的镀膜不能适用各种角度的光线, 这对空心透镜导管的应用带来很大的局限性。实心透镜导管利用光线在透镜入射面的透镜效应及在斜面上的全反射来达到有效耦合抽运光的目的, 具有不需要镀膜、成本低、

容易加工、便于调节等诸多优点, 但透镜导管的设计较为繁琐, 理论和实验证明, 如果透镜导管的尺寸选取不当, 则有可能导致部分传播光线没有从透镜导管的出射端出射, 而是从透镜导管的侧壁折射出去或者从端面反射回去, 从而降低了透镜导管的传输效率。在实际应用中, 耦合效率是一个十分重要的性能指标, 通过耦合效率可以看出透镜导管的优劣。关于耦合效率的求解方法, 大多数都是通过光线追迹而得到的^[5-8]。但是光线追迹方法使用的是几何光学中的反射定律和折射定律再加上空间几何的知识, 这种方法无论是光线传输规律的推导还是最后软件的实现都很复杂。同时二极管阵列发出的抽运光是由大量发光单元分别输出, 并通过不同的路径, 按不同的顺序经过透镜导管的侧面反射传输至输出端面, 反射次数各不相同, 难以直接建立耦合效率的理论模型。BEACH^[2]首次利用镜像法推导了耦合效率的表达式, 但并未讨论不同尺寸的面阵 LDA 及不同尺寸的激光棒对透镜导管的设计有何影响, 本文中基于镜像法得到的耦合效率表达式, 针对不同尺寸的面阵 LDA, 给出其透镜导管的最佳参量, 为透镜导管的设计和使用提供了一定的依据。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10972203)

作者简介: 商继敏 (1977-), 女, 讲师, 现从事激光器器件方面的研究。

E-mail: shjimin2003@zzuli.edu.cn

收稿日期: 2011-03-16; 收到修改稿日期: 2011-03-25

1 理论分析

1.1 镜像法

先用2维情况来说明透镜导管镜像法的示意图(见图1),假设激光二极管阵列中的任何一点传输到透镜导管的入射面时的坐标是 (y_d, z_d) 。该点对应光线的传输情况不一样,有的不经过侧壁直接从输出端面出射,有的经过侧壁1次内全反射,有的经过侧壁2次内全反射等。对于不经过侧壁的光线比较简单,可以直接得到从透镜输出面出射的坐标 (y_c, z_c) ,像经过侧壁的光线相对来说就比较复杂,可以根据经过侧壁的次数再结合镜像法就得到这部分光线对应的区 (y_c, z_c) ,这样最后的光线就形成了一个半圆^[2]。

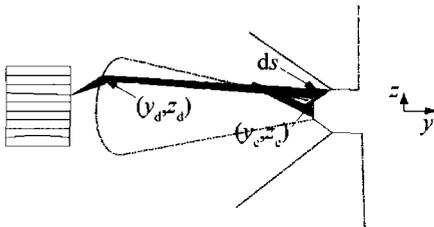


Fig. 1 2-D lens duct and its method-of-images construction

3维情况下用镜像法计算传输效率的方法可由图2进行说明,通过镜像法可以构造一个圆环面^[2]。对于图2中由镜像法得到的圆环面,可由下面参量方程表示:

$$\begin{cases} x_t = (r_o + r_i \cos\theta) \cos\phi \\ y_t = (r_o + r_i \cos\theta) \sin\phi \\ z_t = r_i \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

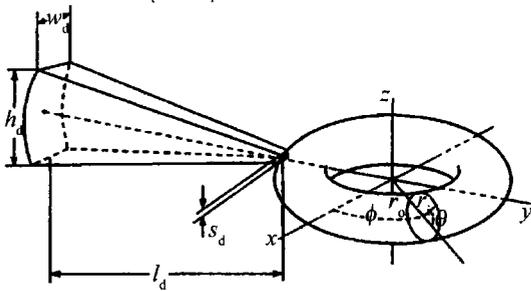


Fig. 2 3-D lens duct and its method-of-images construction

$$dT = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{n_d - 1}{n_d + 1} \right)^2 \right] D \left(x_d, z_d, n_d \theta_x + (n_d - 1) \frac{x_d}{r_d}, n_d \theta_z + (n_d - 1) \frac{z_d}{r_d} \right) \times \\ \left[\frac{d\Sigma \cdot (-\vec{e}_r) n_d^2}{|(x_t - x_d, y_t - y_d, z_t - z_d)|^2} \right] T_{\text{duct} \rightarrow \text{air} \rightarrow \text{rod}}, (d\Sigma \cdot (-\vec{e}_r) > 0) \\ 0, (\text{其它}) \end{cases} \quad (7)$$

θ_x, θ_z 是光线传播方向与 y 轴的夹角:

$$\begin{cases} \theta_x = \sin^{-1} \left[\frac{x_t - x_d}{|(x_t - x_d, y_t - y_d, z_t - z_d)|} \right] \\ \theta_z = \sin^{-1} \left[\frac{z_t - z_d}{|(x_t - x_d, y_t - y_d, z_t - z_d)|} \right] \end{cases} \quad (8)$$

参量 θ, ϕ 的取值范围就是对圆环面的积分范围 $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2, -\pi \leq \phi \leq \pi$ 。上式中需要说明的是, r_i, r_o 分别是指曲面的内外半径,它们的值可通过透镜导管的高度、宽度、长度以及正方形输出面的边长确定。具体表达式为:

$$r_i = \frac{s_d l_d}{h_d - s_d} \quad (2)$$

$$r_o = \frac{s_d l_d}{w_d - s_d} - r_i \quad (3)$$

式中, h_d 为透镜导管的高度, w_d 为透镜导管的宽度, l_d 为透镜导管的长度, s_d 为正方形输出面的边长。在圆环面上取一面元 $d\Sigma$, 与图1中的弧长面元 ds 对应, 设该面元法向量是指向外, 有下式表示:

$$d\vec{\Sigma} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial x_t}{\partial \phi} & \frac{\partial y_t}{\partial \phi} & \frac{\partial z_t}{\partial \phi} \\ \frac{\partial x_t}{\partial \theta} & \frac{\partial y_t}{\partial \theta} & \frac{\partial z_t}{\partial \theta} \end{vmatrix} d\theta d\phi \quad (4)$$

透镜导管中的光线传播方向的单位矢量 \vec{e}_r :

$$\vec{e}_r = \frac{(x_t - x_d, y_t - y_d, z_t - z_d)}{|(x_t - x_d, y_t - y_d, z_t - z_d)|} \quad (5)$$

1.2 耦合效率的推导^[2]

设抽运光光束的空间分布是高斯分布, 对 LD 阵列的尺寸积分得到归一化后的光源函数为:

$$D(x, z, \theta_x, \theta_z) = \frac{1}{w_a h_a \pi \theta_s \theta_r} \times \exp \left\{ - \left[\left(\frac{\theta_x}{\theta_s} \right)^2 + \left(\frac{\theta_z}{\theta_r} \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

式中, θ_r 和 θ_s 是快轴慢轴在 x, z 轴方向的远场发散角(定义为峰值功率的 $1/e$)的半宽, 且 $\theta_s, \theta_r \ll \pi/2$ 。二极管阵列的高度为 h_a , 宽度为 w_a , (6)式是归一化后的式子, 归一化的方法是对 LD 阵列的尺寸积分。图2中光从透镜导管输入面 (x_d, y_d, z_d) 传输到曲面 (x_t, y_t, z_t) 的能量是:

式中, dT 包括4项, 第1项为抽运光在透镜导管入射面的非涅耳透过率; 第2项是二极管输出光的分布函数, 是由(6)式和通过透镜导管输入面的传输矩阵得到的; 第3项为透镜导管成像圆环面上的单位面元相对于二极管阵列的空间立体角, 由(4)式和(5)式可得到; 第4项是从透镜导管输出面经过空气, 直到进入激

光棒的菲涅耳损耗,可表示为如下形式:

$$T_{\text{duct} \rightarrow \text{air} \rightarrow \text{rod}} = (\vec{e}_E \cdot \vec{e}_{s,\text{pol}})^2 \left\{ 1 - \left[\frac{\sin(\theta_a - \theta_d)}{\sin(\theta_a + \theta_d)} \right]^2 \right\} \times \left\{ 1 - \left[\frac{\sin(\theta_r - \theta_a)}{\sin(\theta_r + \theta_a)} \right]^2 \right\} + (\vec{e}_E \cdot \vec{e}_{p,\text{pol}})^2 \times \left\{ 1 - \left[\frac{\tan(\theta_a - \theta_d)}{\tan(\theta_a + \theta_d)} \right]^2 \right\} \left\{ 1 - \left[\frac{\tan(\theta_r - \theta_a)}{\tan(\theta_r + \theta_a)} \right]^2 \right\} \quad (9)$$

要想计算出 $T_{\text{duct} \rightarrow \text{air} \rightarrow \text{rod}}$, 需要知道 $\vec{e}_E, \vec{e}_{s,\text{pol}}, \vec{e}_{p,\text{pol}}, \theta_a, \theta_d$ 和 θ_r 这 6 个值, 下面分别求解它们的值。

由(4)式可以得到曲面的法向量:

$$\vec{e}_i = \frac{d\vec{\Sigma}}{|d\vec{\Sigma}|} \quad (10)$$

θ_d 是指光线传播方向与通过镜像法得到的透镜导管输出面法线之间的夹角, 所以它可以通过(5)式和(10)式得到, 表达式为:

$$\theta_d = \cos^{-1}(-\vec{e}_r \cdot \vec{e}_i) \quad (11)$$

θ_a 是圆环面的法线与透镜和激光棒之间的空气带法线之间的夹角, θ_r 是空气带法线与激光棒入射面法线之间的夹角。根据折射定律有:

$$\theta_a = \sin^{-1}[n_d \sin \theta_d] \quad (12)$$

$$\theta_r = \sin^{-1}\left[\frac{\sin \theta_a}{n_r}\right] \quad (13)$$

式中, n_r 是激光棒的折射率。

$\vec{e}_E, \vec{e}_{s,\text{pol}}, \vec{e}_{p,\text{pol}}$ 这 3 个矢量是由于在 3 维的情况下, 光线不仅有 s 极化方向还有 p 极化方向而产生的。这里为了简化计算, 仍然假设光源极化方向垂直于 z 轴和 \vec{e}_r , 在此条件下可以计算出 s 和 p 极化因子。在曲面上电场极化矢量的单位矢量可以由下式表示:

$$\vec{e}_E = \frac{\vec{z} \times \vec{e}_r}{|\vec{z} \times \vec{e}_r|} \quad (14)$$

而曲面上的 s 极化和 p 极化的单位矢量的表达式为:

$$\vec{e}_{s,\text{pol}} = \frac{\vec{e}_r \times \vec{e}_r}{|\vec{e}_r \times \vec{e}_r|} \quad (15)$$

$$\vec{e}_{p,\text{pol}} = \vec{e}_r \times \vec{e}_{s,\text{pol}} \quad (16)$$

这样从(10)式~(16)式就可以写出 $T_{\text{duct} \rightarrow \text{air} \rightarrow \text{rod}}$ 的表达式。

通过对这个圆环面和二极阵列的外形尺寸积分, 即可得到传输效率, 可用下面表达式表示:

$$\eta = \iint dx_d dz_d \iint dT, \quad \left(-\frac{w_d}{2} \leq x_d \leq \frac{w_d}{2}, -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, -\frac{h_d}{2} \leq z_d \leq \frac{h_d}{2}, -\pi \leq \phi \leq 0 \right) \quad (17)$$

式中, x_d, z_d 为发光单元的坐标。

2 模拟结果

把尺寸大小为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 和 $11\text{mm} \times 11\text{mm}$ 的 LDA 阵列光耦合到不同激光棒, 利用耦合效率计算(17)式, 该式是一个 4 重积分。由于被积函数中的 4 个积分变量之间不是相互独立的, 给求解积分带来了一定的难度, 选择用 C 语言求多重积分的高斯方法进行模拟。当改变一个参量时, 其它参量不变, 就可以得到该参量所对应的耦合效率值, 再利用数据拟合即可求得耦合效率随该参量的变化规律。同样的处理方法, 可以得到耦合效率随透镜导管的各个参量的变化趋势, 并由此可以得到最优的透镜导管参量值。为了保证抽运光在透镜导管斜面上反射是全反射, 透镜导管的折射率必须大于 1.414, 虑到选择材料的问题, 选取折射率为 $n = 1.5$ 的 K9 玻璃作为透镜导管。针对实验中给定不同激光棒的直径, 则可以知道透镜导管输出端面的正方形的边长: $s_d = \text{激光棒的直径}/\sqrt{2}$, 当 s_d 分别为 1.0mm, 1.2mm, 1.4mm 3 个不同值时, 计算结果如下。

图 3 所示是 LDA 尺寸是 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$, 快轴和慢轴的发散角分别是 40° 和 10° , 快轴方向的发散角经过微透镜压缩后为 20mrad 。在透镜导管的长度 $l_d = 27.5\text{mm}$, $n = 1.5$, 输出面的边长 s_d 给定时, 从图 3 可以看出, 耦合效率随着透镜导管的曲率半径的增加呈现出一种先增加后减小的趋势。利用耦合效率随透镜导管曲率半径的这种变化关系, 很容易找出透镜导管的最优曲率半径, 从图 3 可以看出, 对于不同的激光棒对应的透镜输出端面的边长不同, 而透镜导管的最优曲率半径均是 10mm 。在这个曲率半径下透镜导管的耦合效率随着透镜导管输出面边长 s_d 的增加耦合效率也在逐渐地增加, 这与实际情况也是吻合的, 当输出面的边长 $s_d = 1.4\text{mm}$ 时, 即实现了光斑面积压缩比为 50 倍时, 最大耦合效率可以达到 84%, 当 s_d 分别为 1.2mm 和 1.0mm 时的最大耦合效率为 75% 和 64%, 同时根据文献资料^[2], 设计透镜导管的最佳长度为:

$l_d = 0.92R \times \frac{n}{n-1}$, R 为曲率半径。将 $l_d = 27.5\text{mm}$, $n =$

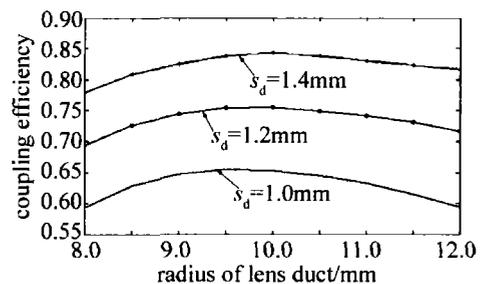


Fig. 3 Size of LDA: $10\text{mm} \times 10\text{mm}$

1.5代入上式,就可以求出透镜导管的最优曲率半径 $R = 10\text{mm}$,这个值与图3中得到的最优曲率半径结果是一样的,说明通过耦合效率得到的最优曲率半径与通过公式得到的结果十分吻合。同时,也证明了通过耦合效率与透镜导管参量的关系来进行透镜导管设计是一个很好的方法。LDA尺寸是 $11\text{mm} \times 11\text{mm}$ 时, $l_d = 30.36\text{mm}$,其它参量的取值同上,得到图4所示的结果,透镜导管的最优曲率半径均是 11mm ,当输出面的边长 $s_d = 1.4\text{mm}$ 时,通过最优参量得到最大耦合效率为可以达到 69% , s_d 分别为 1.2mm 和 1.0mm 时的最大耦合效率为 62% 和 54% 。分析图3和图4可以发现,当输出面的边长一样时,LDA的尺寸越大,耦合效率越小; LDA尺寸一定时,耦合效率随输出面的边长的不同差别很大,输出面的边长越大,耦合效率越高。即表明耦合效率与LDA的尺寸及与输出面的边长是相互关联的量,在实际应用中应综合考虑以上因素。

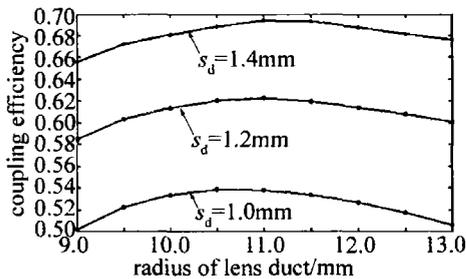


Fig. 4 Size of LDA: $11\text{mm} \times 11\text{mm}$

3 结论

透镜导管用于大功率激光二极管阵列整形具有很

大的发展潜力。将其选为整形系统,根据镜像法得到了耦合效率表达式,模拟了耦合效率与不同LDA尺寸及输出面边长之间的关系。实际应用中,对于一定发光面的激光二极管阵列,当耦合效率达到某个需要值时,利用本文中耦合效率与输出面边长之间关系,即可得到输出面边长的大小,从而实现透镜导管的整形应用。

参考文献

- [1] FEUGNET G, BUSSAC C, LARAT C, *et al.* High-efficiency TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser longitudinally pumped by a high-power array[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(2): 157-159.
- [2] BEACH R J. Theory and optimization of lens ducts[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(12): 2002-2015.
- [3] FU R L, WANG G J, WANG Z Q, *et al.* Design of efficient lens ducts[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(18): 4000-4003.
- [4] FU R L, WANG G J, ZHANG L Q, *et al.* Simplify design of lens duct as coupling system for all-solid-state lasers[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* 1998, 9(2): 96-99 (in Chinese).
- [5] GAO H Y, FU R L, QIN H, *et al.* Optimization of lens duct[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(4): 398-400 (in Chinese).
- [6] JIA W, HU Y M, LI M Z, *et al.* Simulation and design of hollow lens duct as a new kind of coupling system for high power laser diode arrays[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2004, 31(8): 939-942 (in Chinese).
- [7] ZHANG B, CHEN M, LI G. The coupling-theory-design of the high-power semiconductor lasers[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4): 433-436 (in Chinese).
- [8] GAO H Y, FU R L, CHEN D S, *et al.* Design of hollow duct as coupling system in solid-state laser end-pumped by LDA[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(5): 541-544 (in Chinese).
- [9] PRINZ V Y. A new concept in fabricating building blocks for nano-electronic and nanomechanic devices[J]. *Microelectronic Engineering*, 2003, 69(2/4): 466-475.
- [10] LÜ P, GUO X Q, WANG J X, *et al.* Preparation of nano-Si/SiN_x film and its application in passive Q-switch of Nd:YAG laser[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 163-165 (in Chinese).
- [11] HSU V S, KAHN J M, PISTER K S J. MEMS corner cube retroreflectors for free-space optical communications[D]. Berkeley, USA: University of California, 1999: 11-13.
- [12] ZHOU L X, PISTER K S J, KAHN J M. Assembled corner-cube retroreflector quadruplet[C]//The 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Las Vegas, USA: IEEE, 2002: 556-559.
- [13] HONG Y K, SYMS R R A, PISTER K S J, *et al.* Corner cube reflectors by surface tension self-assembly[C]//9th IEEE/LEOS Conference on Optical MEMS. Kagawa, Japan: IEEE, 2004: 2-56.
- [14] NIKISHKOV G P, NISHIDATE Y, OHNISHI T, *et al.* Effect of material anisotropy on the self-positioning of nanostructures[J]. *Nanotechnology*, 2004, 17(4): 1128-1133.
- [15] LUO J K, HE J H, FU Y Q, *et al.* Fabrication and characterization of diamond-like carbon/Ni bimorph normally closed microcages[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(8): 1406-1413.
- [16] LUO J K, HUANG R, HE J H, *et al.* Modelling and fabrication of low operation temperature microcages with a polymer/metal/DLC trilayer structure[J]. *Sensors and Actuators*, 2006, A132(1): 346-353.
- [17] VOROB'EV A, VACCARO P O, KUBOTA K, *et al.* SiGe/Si microtubes fabricated on a silicon-on-insulator substrate[J]. *Journal of Physics*, 2003, D36(17): 67-69.
- [18] VACCARO P O, KUBOTA K, AIDA T. Strain-driven self-positioning of micromachined structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(19): 2852-2854.
- [19] ARORA W J, NICHOL A J, SMITH H L, *et al.* Membrane folding to achieve three-dimensional nanostructures: Nanopatterned silicon nitride with stressed chromium hinges[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(5): 053108/1-053108/3.
- [20] NIKISHKOV G P, KHMYROVA I, RYZHII V. Finite element analysis of self-positioning microstructures and nanostructures[J]. *Nanotechnology*, 2003, 14(7): 820-823.