

文章编号: 1003-501X(2008)11-0082-04

用于片状放大器抽运的耦合导光管研究

赵天卓^{1,2,3}, 樊仲维^{1,3}, 崔建丰³, 单肖楠⁴,

王培峰^{2,3}, 麻云凤^{1,2,3}, 冯承勇^{2,3}, 郭芳^{2,3}

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085;
4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 采用光线追迹的方法研究了半导体激光二极管阵列(Laser Diode Array, LDA)抽运的耦合导光管的效率特性。分析了耦合导光管在理想情况下的反射率, 并对不同参量的耦合导光管进行了模拟, 得到了耦合导光管的反射率与结构参量之间的变化关系。提出了耦合导光管侧壁等效反射次数的概念, 并通过光线追迹和数值拟合得到了等效反射次数与耦合导光管结构参量之间的近似数学表达式, 最后通过实际工程设计实验对上述模拟进行了验证。

关键词: 半导体抽运; 耦合导光管; 光线追迹; 激光二极管阵列; 片状放大器

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

Coupling Duct for Slab Amplifier Pumping

ZHAO Tian-zhuo^{1,2,3}, FAN Zhong-wei^{1,3}, CUI Jian-feng³, SHAN Xiao-nan⁴,
WANG Pei-feng^{2,3}, MA Yun-feng^{1, 2, 3}, FENG Cheng-yong^{2,3}, GUO Fang^{2,3}

(1. The Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Beijing GK Laser Technology Co, Ltd, Beijing 100085, China;

4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China)

Abstract: The coupling duct characteristics used in Laser Diode Array (LDA) pumped slab amplifiers was investigated by ray tracing. The ideal reflective characters were analyzed at first. And then, the coupling ducts with different parameters were simulated to prove the relation between coupling duct reflection and structure parameters, which showed that ducts had its own loss and the relations between duct reflectivity and its structure parameters were obtained. The concept of duct side wall equivalent times of reflection was also put forward, which could be used to calculate the reflection loss on the side wall. After ray tracing and numerical fitting, an approximate mathematical expression was gotten, which could be well used to show the reflection situation of duct. Finally, an experiment about practical project design was done to prove the good precision of the simulation.

Key words: semiconductor-pumped; coupling duct; ray tracing; laser diode array; slab amplifier

1 引言

在大功率 LDA(Laser Diode Array)抽运的放大器中, 由于受到价格和长期稳定工作特性等因素的限制, 在 LDA 中通常选取的 Bar 条功率还比较有限。这就使得 25 kW 大功率多程片状放大系统中的 LDA 需要由

收稿日期: 2008-06-23; 收到修改稿日期: 2008-08-10

基金项目: 国家 863 计划基金资助课题(2007AA032448),

北京市高成长企业自主创新科技专项项目(高功率半导体激光阵列光线耦合模块及应用系统)。

作者简介: 赵天卓(1980-), 男(汉族), 黑龙江大庆人, 博士研究生, 主要研究工作是半导体抽运的片状放大器。E-mail: herachles@163.com

168 个功率 150 W 的 Bar 条构成, 面积约为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。在将抽运光高效耦合到片状工作物质上时, 采用了 Bar 条快轴加柱透镜压缩发散角, 然后通过光学导光管(Duct)压缩的方法。Duct 作为其中的匀光缩束器件, 其结构参量对于抽运耦合效率有着重要的意义^[1-3]。目前对于 Duct 的分析通常采用根据光线特点分类后进行几何光学分析的方法, 这往往只能分析一些特定的简单情况, 而不能得到 Duct 的一些重要的总体特性^[4-6]。并且按照理想平行光分析的 Duct 传输特性和按照 LDA 光源分析的 Duct 存在很大差异。本文在具有空间高斯分布的 LD 发光特性的光源阵列模型基础上, 通过对大量随机光线的追迹, 对 Duct 的反射规律进行了分析。得到了 Duct 的反射效率、等效反射次数、总体反射损耗与 Duct 结构的关系。这些计算对设计效率最优化的 Duct 结构有着重要的意义。

2 Duct 和 LDA 的主要结构参量

Duct 的主要结构参量有: 1) Duct 的长度 L ; 2) Duct 的入光口宽度 $2X$ 和高度 $2Y$; 3) Duct 的出光口宽度 $2x$ 和高度 $2y$ 。在较普遍情况下, 由以上参量得到的 Duct 侧壁与轴线夹角

$$\theta = \theta_x = \theta_y = \arctan \frac{X-x}{L} = \arctan \frac{Y-y}{L} \quad (1)$$

对于在一个水平面内传播的光线, 假设光线与 Duct 侧壁的夹角按照反射次数分别表示为 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \dots$, LDA 发出的光在 Duct 的侧壁反射时, 第 n 次反射光线与 Duct 轴线的夹角可表示为

$$\alpha_n = \alpha_0 + 2n\theta \quad (2)$$

选取的 LDA 结构参考了对应于实际的 Bar 条结构参量: 横向长度 10 mm, 排列 60 个发光点, 间隔 0.17 mm; 纵向单线间隔 0.8 mm。对于每个 LD 点光源, 我们采用

$$I(\theta_x, \theta_y) = I_0 \exp \left[-2 \left[\left(\frac{\theta_x}{\alpha_x} \right)^2 + \left(\frac{\theta_y}{\alpha_y} \right)^2 \right] \right] \quad (3)$$

来表征其光场的空间分布^[6]。其中 α_x, α_y 为 LD 的水平和垂直发散角, 分别为 FWHM 角度 10° 和 40° ; θ_x, θ_y 为空间角度的水平、垂直分量。

在分析过程中, 用 ZEMAX 软件对每个发光点按照 LD 的高斯光强分布特性进行模拟, 总共追迹了 2,000,000 条随机光线。由于分析时认为这些光线具有相同的光功率, 在探测面上光强分布与光线数量呈现相同的分布特性。通过计算光线的条数, 就可以得到等效的光强, 从而计算 Duct 的效率和反射次数等参量。

3 Duct 的反射率与结构关系

理想反射的 Duct 可以很好的反映 Duct 的光学特性。而根据追迹结果, 我们发现与一些文献中设想的不一致, 即使理想反射的 Duct 也不能达到 100% 的效率^[5], 而是依然存在一定的反射。而这个反射的比例随着 Duct 的结构参量和光源的特性的不同而变化。当经过多次反射时, α_n 可能大于 90° , 使得光线向回偏折从入射口射出。

图 2 中曲线表示入口大小分别为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 、 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 、 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 、 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 、 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 出口为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 Duct 的导光管效率随着其长度变化的曲线。对于出入口相同大小 Duct 来说, 长的 Duct 可以获得更高的效率, Duct 的效率随长度增加而增加, 但是随着长度的增加效率提高速度逐渐降低, 当长度超过一定数值时, 长度增加对效率的影响很小。而考虑到实际 Duct 材料的吸收和散射, 过长的 Duct 的效率会下降。因此对于 Duct 也可以计算得到一个最优化的长度值, 而这个数值的选取与 Duct 的侧壁反射率有关。此外, 入口大小不同相同长度的 Duct 存在着较大的效率差异, 并且入口小的 Duct 只需要较短的长度就能够达到效率的最佳值。

图 3 绘制的是 Duct 的侧壁与中心轴的夹角 θ 和 Duct 效率的关系曲线。从图 3 可以看到, 对于随着 Duct

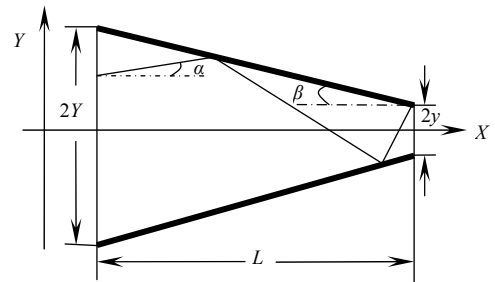


图 1 Duct 结构参量及传播光线参量

Fig.1 Duct structure parameters and transmitting light parameters

长度的增加, 倾角减小, 效率升高; 但是对于倾角相同而入口大小不同的 Duct 却依然存在着不同的效率。在相同倾角的情况下, 入射口小的 Duct 的长度更短, 其效率更高。换句话说, Duct 反射率并不是简单的和侧壁与中心轴的夹角 θ 成反比关系, 而是和 Duct 的出入口大小、长度等因素同时存在关联。所以当设计需要满足一定效率要求的 Duct 时, 并不能仅仅考虑 Duct 的侧壁夹角, 而是需要同时考虑夹角和入口、出口大小以及长度。

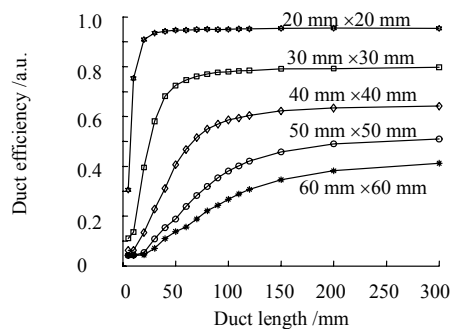


图 2 Duct 效率与长度的关系

Fig.2 Relation between duct efficiency and length

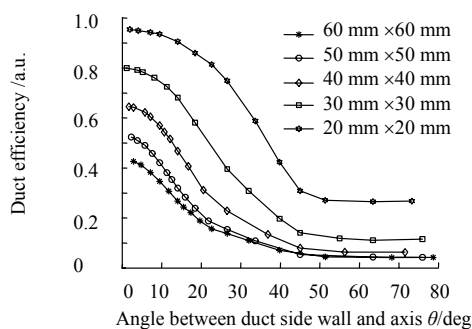


图 3 Duct 的效率和侧壁与轴线夹角 θ 的关系

Fig.3 Relation between duct efficiency and θ

4 Duct 的等效反射次数与结构关系

由于 LD 发出的光是按照式(3)分布的空间立体角, LDA 发出的光存在直接照射到出口、经过相对侧壁或者相邻侧壁多次反射、经过数次反射后回射的多种复杂情况。尤其是对于较长的 Duct, 更难以清楚的划分反射类别和计算各个反射类别的权重系数。而采用通过对 Duct 侧壁反射各条光线的总次数和进入 Duct 总模拟光线条数的比来确定 Duct 的等效反射次数是解决这个问题的行之有效的方法。

由式(2)可知, 每次反射使得光线与 Duct 轴线的夹角增大, 同时使得光反射一次在 Duct 中行进的距离减少, 因此在出光口处光线对 Duct 侧壁的光强分布模拟结果如图 4 所示。光从模拟图的左侧大口处进入, 在右侧射出。在从左到右的过程中, 侧壁反射的光能密度逐渐增加, 其数值经过归一化后表示在右侧的对比条中。

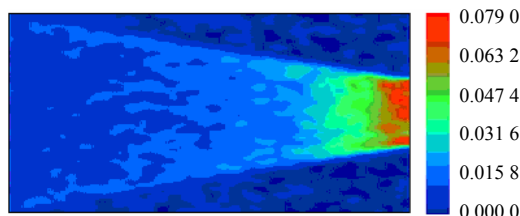


图 4 Duct 侧壁反射光的归一化光强分布图

Fig.4 Light intensity distribution of duct side wall

对于实际的 Duct 来说, 侧壁反射率不为 100% 是对 Duct 自身效率影响的重要因素。因此提出 Duct 的侧壁

等效反射次数来估算真实 Duct 中光在反射过程中的损耗是十分必要的。侧壁等效反射次数定义为通过光线追迹获得的 Duct 四个侧壁上总的反射次数与 Duct 入射光线条数的比。这里需要指出的是, 由于实际中 Duct

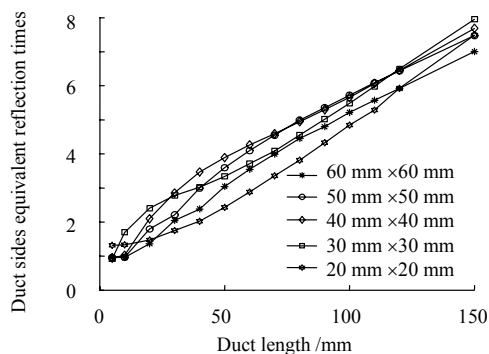


图 5(a) Duct 等效反射次数与长度的关系

Fig.5(a) Relation of duct sides equivalent reflection times and length

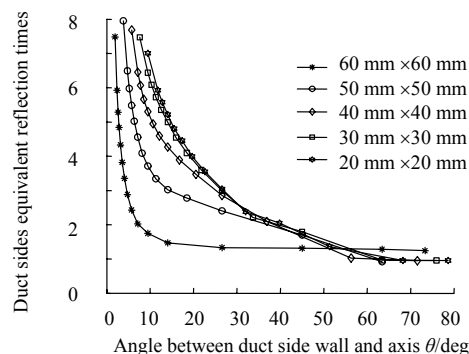


图 5(b) Duct 等效反射次数与侧壁与轴线夹角 θ 关系

Fig.5(b) Relation of duct sides equivalent reflection times and θ

材料表面的反射和散射损耗影响 Duct 中光的强度，这使得等效反射次数的计算存在一定的误差，但是在反射率较高和等效反射次数较少的情况下，这种误差是可以接受的。

表 1 Duct 等效反射次数的曲线拟合

Table 1 Curve fitting of duct side wall equivalent reflection times

Duct entrance sides $X,Y/mm$	Fitting results($y=P_1x^4+P_2x^3+P_3x^2+P_4x+P_5$)	Residual
60×60	$y=2.7\times10^{-8}x^4-8.68\times10^{-6}x^3+8.27\times10^{-4}x^2+2.19\times10^{-2}x+0.745$	0.223
50×50	$y=2.2\times10^{-8}x^4-6.32\times10^{-6}x^3+4.51\times10^{-4}x^2+5.10\times10^{-2}x+0.581$	0.273
40×40	$y=1.77\times10^{-8}x^4+8.05\times10^{-6}x^3-1.27\times10^{-3}x^2+1.19\times10^{-1}x+0.200$	0.326
30×30	$y=5.63\times10^{-8}x^4+1.88\times10^{-5}x^3-2.01\times10^{-3}x^2+1.19\times10^{-1}x+0.549$	0.353
20×20	$y=1.05\times10^{-8}x^4-4.52\times10^{-6}x^3+7.48\times10^{-4}x^2+5.0\times10^{-3}x+1.31$	0.097
Fitting results ($y=P_1x+P_2$)		
60×60	$y=4.4\times10^{-2}x+0.724$	0.609
50×50	$y=4.7\times10^{-2}x+0.959$	1.010
40×40	$y=4.5\times10^{-2}x+1.226$	1.196
30×30	$y=4.4\times10^{-2}x+1.156$	0.745
20×20	$y=4.3\times10^{-2}x+0.558$	0.991

通过图 5 和表 1 可以发现，虽然在 Duct 长度较短时 Duct 的等效反射次数与 Duct 的长度呈现一定的波动，但是在较长的范围上总体呈线性关系。入口大的 Duct 的线性拟合的斜率会略微提高，但总体变化不大。这主要是由于入口大的 Duct 的侧壁与轴线的夹角更大，光线在经过每次反射时，由式(2)可知光线与轴线的夹角增大的更多。而这使得光线在 Duct 的轴向方向移动的距离更小，因此光线需要在 Duct 中反射的更久，等效反射次数也更高。对于具有相同的侧壁与轴线夹角的 Duct，由于开口大的 Duct 相对较长，等效反射次数也更高。Duct 开口小的反射次数少，而当 Duct 长度增大到一定程度时，入口大小的影响开始变小，曲线开始聚集在一起。通过上表的公式，可以较为精确的估算 Duct 的等效反射次数。

5 实验和验证

实验中选取的阵列由 168 个 Bar 条构成，其中 Bar 条参量和结构参量与前面模拟的一致。选取的两个 Duct 参数分别为：Duct1 入口 15.70 mm×10.16 mm，出口 9.32 mm×10.08 mm，长度为 29 mm，采用石英玻璃制作，内壁镀银后镀保护膜。Duct2 入口 22.02 mm×16.22 mm，出口 10.32 mm×10.54 mm，长度 50 mm，采用铜面抛光后镀银和保护膜。具体的实验的原理、实际结构如图 6 所示。

在实验过程中，首先测试 Duct 出口的能量值，然后把能量计放在 Duct 入口的相同位置，前端紧贴能量计入口放置一个与 Duct 入口尺寸相同的光阑，测量 Duct 入口的能量数值。通过入口出口能量的比来计算 Duct 的效率。对实验获得的实际结果与模拟的结果进行对比，如表 2。

对两组实验数据进行对比，发现数据还是存在一定的差异，误差产生的主要原因是：Duct 由四片反射镜粘贴而成，四条内棱上缝隙的反射率很低，存在漏光现象；Duct 粘贴时镜片的不平行、不对称；Duct 测试时的摆放倾斜、不共轴。

(下转第 90 页)

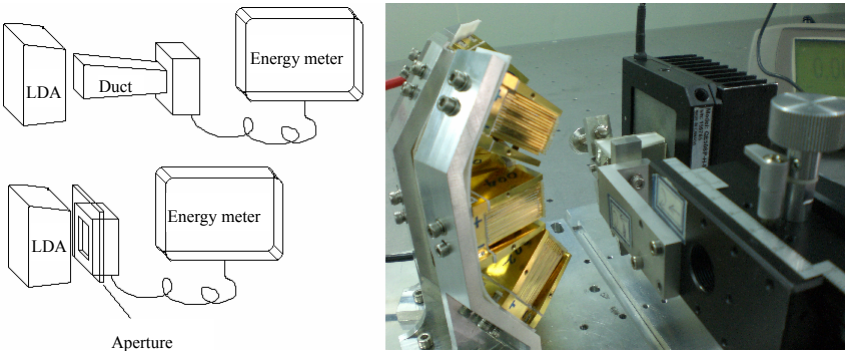


图 6 Duct 效率测量实验原理和装置图

Fig.6 Duct efficiency measurement theory and experiment setup

表 2 Duct 的实验和模拟对比

Table 2 Contrast of duct experiment and simulation

	Duct1	Duct2
Duct actual measurement efficiency	65.2%	33%
Duct theoretical efficiency	78.4%	39.6%
Duct sides equivalent reflection times	3.76	4.72
Duct side reflectivity	98.5%	97%
Error	7.56%	1.4%

6 结 论

三轴紫外敏感器的研制成功为卫星姿态定位提供一种新的测量部件。紫外波段被证明是稳定的,三轴紫外敏感器不仅可以敏感地球,而且还可以敏感其它星体,如月球和火星等,解决了红外地球敏感器由于缺少大气敏感其它星体的不稳定问题。三轴紫外敏感器的测试结果达到设计要求,为紫外月球敏感器的研制奠定了基础,对深空探测具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Douglas Pledger, Jame Billing-Toss, William Saylor. Low Cost Ultraviolet 3 Axis Attitude Sensor System [C]// **Small-Satellite Technology and Application**. [S.l.]: SPIE, 1940: 231-238.
- [2] Douglas Pledger, Jame Billing-Toss, William Saylor. Low Development of Honeywell's Earth Reference Attitude Determination system(ERADS)[C]// **Proceedings of the 7th annual AIAA/USU conference on Small Satellites**. Logan, UT, USA: [s.n.], 1993: 437-443.
- [3] Janz S J. Rayleigh Scattering Attitude Sensor [J]. **SPIE**, 1996, **2831**: 146-153.
- [4] 王立, 郝云彩. 一种成像敏感器对月定姿算法 [J]. 宇航学报, 2007, **28**(1): 39-42.
WANG Li, HAO Yun-cai. The Novel Algorithm of Attitude Determination for Luna Used by Imaging Sensor [J]. **Journal of Astronautics**, 2007, **28**(1): 39-42.
- [5] 王立, 郝云彩. 环月卫星成像敏感器对月姿态确定算法 [J]. 中国空间科学技术, 2006, **26**(6): 14-17, 41.
WANG Li, HAO Yun-cai. Attitude Determination Algorithm Used by Lunar Satellite's Imaging Sensor [J]. **Chinese Space Science and Technology**, 2006, **26**(6): 14-17, 41.

~~~~~  
(上接第 85 页)

## 6 结 论

通过以上的光线追迹分析和实验,得到了用于 LDA 抽运片状放大器的耦合导光管的一些光学特性,通过这些特性可以较好的估算实际 Duct 的效率,进而获得整个抽运系统的效率。同时需要指出的是,对于实际的 LDA 抽运片状放大器来说,Duct 对光的匀化程度也十分重要,因此对于 LDA 匀光缩束的 Duct 还需要进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] Satoshi Yamaguchi, Tetsuro Kobayashi, Yoshimasa Saito, *et al.* Efficient Nd: YAG laser end pumped by a high-power multi-stripe Laser diode bar with multi-prism array coupling [J]. **Applied Optics**, 1996, **38**(9): 1430-1435.
- [2] Raymond J Beach, William J Bennett. Lensing duct: United States, USO05307430A [P].1994.
- [3] Raymond J Beach. Hollow lensing duct: United States, USO06160934A [P]. 2000.
- [4] Sudesh V, Asai K, Shimamura K, *et al.* Mitchell room-temperature Tm, HO: LuLiF<sub>4</sub> laser with a novel quasi-end-pumping technique [J]. **Applied Optics**, 2001, **26**(21): 1675-1677.
- [5] 郝洪云,傅汝廉,陈德胜,等. LDA 端抽运固体激光器的耦合系统空心导管的设计 [J]. 光电子·激光, 2005, **16**(5): 419-423.  
GAO Hong-yun, FU Ru-lian, CHEN De-sheng, *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): 419-423.
- [6] 贾伟,胡永明,李明中,等. 空心透镜导管的模拟与设计 [J]. 中国激光, 2004, **31**(8): 939-942.  
JIA Wei, HU Yong-ming, LI Ming-zhong, *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 Lasers**, 2004, **31**(8): 939-942.