

文章编号: 1001-3806(2005)04-0404-03

一种 LD 侧面抽运固体激光棒光线追迹的数值计算

赵存华^{1,2}, 樊仲维¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 介绍了一种 LD 侧面抽运固体激光棒光线追迹的数值计算方法, 并根据光线追迹公式编制了程序, 画出了激光棒内光强的相对分布图。从光强的分布图可以看出, 激光棒内光强的分布均匀。该程序使用方便、可行。

关键词: LD 侧面抽运固体激光器; 光线追迹; 数值计算; 光强

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

The numerical calculation of a diode side-pumped solid-state laser

ZHAO Cun-hua^{1,2}, FAN Zhong-wei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanism and Physic, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2 School of Graduate, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The numerical calculation of the diode side-pumped solid-state laser and the software used to trace the rays refracted into the solid-state laser rod are introduced in detail. The graph in the cross-section of the laser rod is drawn according to distributions of each ray. From the graph, it can be seen that the intensity of the cross-section is uniform. The software is convenient and available.

Key words: LD side-pumped solid-state laser; ray trace; numerical calculation; intensity

引 言

由于半导体激光二极管 (LD) 的输出波长和固体激光器工作物质的吸收波长相匹配, 使得 LD 抽运固体激光器器件效率很高 (如侧面抽运光-光转换效率能做到 34% 以上, 光学斜效率超过 50%^[1] 以上), 且小型化、全固态。此外, 抽运灯寿命只有 400h, 需经常更换, 而 LD 阵列的寿命可达 $2 \times 10^4 \text{h}^{[2]}$ 以上, 寿命大大增长。由于 LD 输出波长峰值是 804.5nm ~ 808.5nm, 除了有利于 Nd:YAG 等工作物质吸收外, 而且产生很小的热效应, 因为抽运灯的光谱范围很宽, 非吸收波长部分都转化成了热量, 而 LD 的输出波段都在很好的吸收范围之内, 所以光-光转化效率很高。因此, LD 抽运固体激光器是固体激光器的一次革命, 为固体激光器向大功率、高光束质量、高稳定性方面迈了一大步。

在设计 LD 抽运固体激光器时, 为了能在制出样品以前, 大致了解所设计的可行性, 一般都要进行计算机数值模拟。为了减小热透镜效应和热应力, 应尽量使激光棒内受抽运光照均匀。作者在参考了文献 [3] 之后, 设计了数值模拟计算 LD 抽运固体激光器的程

序, 对一个典型的 LD 侧面抽运方式, 用程序追迹出了激光棒横截面内的光强分布, 为 LD 抽运固体激光器的前期设计提供了重要参考。

1 一种 LD 侧面抽运固体激光棒的数值计算方法

1.1 能量的分解

由于 LD 的输出光强截面是椭圆面。对于线阵 LD 激光器, 比如 Thomson-CSF 公司的 THC1725-R2 型 LD 线阵。发光区域为 24mm × 0.001mm。平行于结平面尺寸远远大于垂直于结平面尺寸, 因此在平行于结平面上的发光近似相同。只取一个垂直于结平面的截面, 其光强按高斯函数分布为:

$$E(\theta_i) = E_0 \exp(-2\theta_i^2/\theta_e^2) \quad (1)$$

式中, $\theta_e = w(z)/z$ 是 LD 线阵二极管激光器垂直于结平面上的最大发散角的一半, θ_i 是 LD 线阵方向光线的发散角。如图 1 所示。对于一般的 LD 线阵, $\theta_e \leq 20^\circ$ 。对于 θ_i 从 0 到 θ_e 进行等分光束, 对于每一个光束进行光线追迹, 在激光棒里形成一条光线。这些光线在激光棒里的光线叠加就是光强的综合图像分布。在细分 θ_e 时, 其每一条光线的能量按 (1) 式变化。为了使问题简化, 假定在水中、空气中光传播的能量没有损失, 这样并不影响每一方向 θ_i 上的光强的相对分布, 因此, 激光棒的光吸收图像形状不会发生改变。对于

作者简介: 赵存华 (1975-), 男, 硕士, 现从事大功率全固态激光器的研究。

E-mail: zhaocunhua@sina.com

收稿日期: 2004-04-12; 收到修改稿日期: 2004-05-20

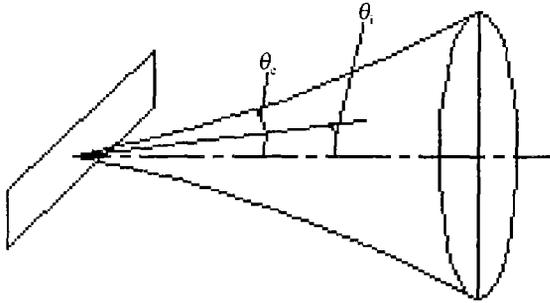


Fig 1 LD output wave type

每一个 θ_i 方向的光线赋予一个灰度等级。从 0 到 θ_c 灰度的按 (1) 式变化。

1.2 光线追迹

如图 2 所示。设计了一种 3 个 LD 线阵抽运 Nd YAG

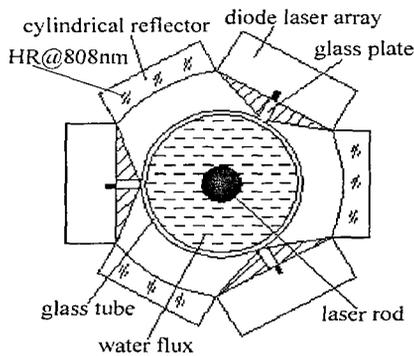


Fig 2 Configuration of LD around laser rod

棒的光线耦合方式。LD 线阵与激光棒相对圆柱反射镜是相互共轲的。由于激光棒有一定的尺寸,且要尽量使光照均匀,所以不必对反射镜进行像差设计,像差的存在反而是有利的。由 LD 线阵到反射镜中心 O 的距离 l 和激光棒心到 O 的距离 l' 可以算出反射球面镜半径 r :

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{2}{r} \quad (2)$$

在已知 l, r 的情况下对任一 θ_i 光线进行追迹。

1.2.1 直接照射 建立如图 3 所示的坐标系,是光线

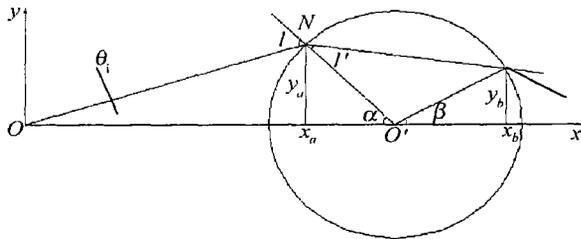


Fig 3 Directly trace ray

直接射到激光棒上的情形。由图可知,光线 ON 的方程为:

$$y = x \tan \theta_i \quad (3)$$

激光棒的方程为:

$$[x - (l - l')]^2 + y^2 = a^2 \quad (4)$$

由 (3) 式、(4) 式联立可得 x_a, y_a 。

由图可直接算第 1 次折射时的出射光线的方程为:

$$y = y_a + (x - x_a) \tan \alpha' \quad (5)$$

式中, α 是出射光线与 x 轴的夹角,可由图求得:

$$\alpha' = i' + \pi - \alpha \quad (6)$$

同时可以求得出射光线与激光棒外圆的另一交点 x_b, y_b , 从 x_a, y_a 到 x_b, y_b 画一条过激光棒的直线。

1.2.2 反射照射 当 LD 光线的出射方向超出激光棒外圆时,光线先在后面的反射镜上反射,然后射到激光棒上。由于球面反射镜不是理想成像的光学系统,所以必定有像差存在。那么反射光线与光轴的交点不完全在激光棒的中心。此时应用球面折射光路的计算公式^[4]:

$$\sin I = \frac{l - r}{r} \sin U \quad (7)$$

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \quad (8)$$

$$U' = U + I - I' \quad (9)$$

$$L' = r + r \frac{\sin I'}{\sin U'} \quad (10)$$

对于反射镜 $n = -n'$ 。当反射光线投射到激光棒上时,发生折射,建立图 4 所示的坐标系。可求得反射光

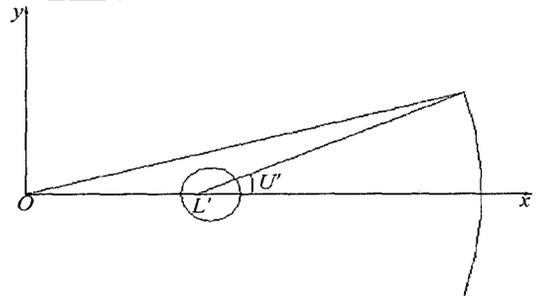


Fig 4 Trace ray through reflector

线的方程为:

$$y = (x - l + L') \tan U' \quad (11)$$

由 (4) 式, (11) 式可得:

$$x_a = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (12)$$

式中, $A = 1 + \tan^2 U'$; $B = -2[(1 + \tan^2 U')l - l' - L' \tan^2 U']$; $C = (l - l')^2 + (l - L')^2 \tan^2 U' - a^2$ 。

由 (11) 式可以算得 y_a 。把激光棒放大如图 5 所

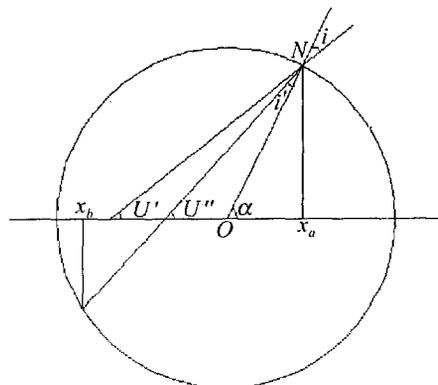


Fig 5 Refracted rays into laser rod by reflector

示。从图上可以算出法线 ON 的方程为:

$$y = (x - l + l') \frac{y_b}{x_a - l + l'} \quad (13)$$

由(12)式,(13)式可得入射角 i 及折射光线的方程:

$$y = y_a + (x - x_a) \tan U'' \quad (14)$$

同理可以求得另外的一个交点 x_b, y_b 。

1.3 激光棒横截面能量图的绘制

由于光线在激光棒内是按指数衰减的。即:

$$E = E_0 \exp(-\alpha d) \quad (15)$$

式中, E_0 是进入激光棒边界时的光能量,即 N 点的光能量, α 是激光棒的衰减系数, d 是光线在激光棒内传播的距离。由(15)式可知下一个 i 点与上一个点 $i-1$ 的能量关系为^[3]:

$$E_i = E_{i-1} \exp(-\alpha \Delta d_i) \quad (16)$$

Δd_i 是相邻两点间的距离,用灰度代表能量,则灰度值按(16)式变化。

2 结论

把以上光线追迹方程采用 VISUAL BASIC 5.0 编制了程序,使之可以直观地看出激光棒内光强的相对分布,以用于指导进行 LD 线阵侧面抽运固体激光器的进一步设计和实验。从图上可以看出,所设计的 LD 侧面抽运方式中,激光棒内横截面光照均匀。且由于采用了共轭成像设计方法,所以,LD 抽运光几乎全部都进入了激光棒内,光线耦合效率很高(超过 95%以

上),因此光-光转换效率很高。从图上还可以看出,光强成近似三角形分布,与激光棒的基模模体积重合得比较好,是一种比较好的 LD 侧面抽运固体激光器耦合方式。

由程序可以看出,以上的 LD 侧面抽运固体激光棒的数值计算方法能够很好地指导 LD 侧面抽运源的设计,但是这只是一种特殊的耦合方式。比如对于更多 LD 阵列抽运方式、LD 阵列抽运条状激光棒、反射面不是圆柱反射镜而是棱镜全反射面^[5]等等情况,都需要对该程序进行改造,以满足其通用性。但其光线追迹思想不变,有些方法,如能量的分割、光线的衰减等等完全可以通用。

参考文献

(上接第 379 页)

该方法不需要引入有效腔长和增益增强系数等参量,所得出的结果直接与器件的结构相对应。还能够解释和预测一些新的物理现象,如随着载流子浓度的增加,有源区的等效折射率下降,增益峰值波长会向短波长移动;量子阱堆位置的改变,不仅引起增益大小的改变,还会导致增益峰值波长移动等等。

参考文献

- [1] WIEDNMANN D, MOELLER B, MICHALZIK R. Performance characteristics of vertical-cavity semiconductor laser amplifier [J]. Electron Lett, 1996, 32(4): 342~343.
- [2] PIPRED J, BJORN E S, BOWERS J E. Optical gain-bandwidth product of vertical-cavity amplifiers [J]. Electron Lett, 2001, 37(5): 298~299.
- [3] BJORN E S, BOWERS J E. Noise figure of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J Q E, 2002, 38(1): 61~66.

- [1] MOON H J, YIJ H, HAN J *et al*. Efficient diffusive reflector-type diode side-pumped Nd:YAG rod laser with an optical slope efficiency of 55% [J]. Appl Opt, 1999, 38(9): 1772~1776.
- [2] 王海林,黄维玲,周卓尤 *et al* 二极管激光器运行特性的研究 [J]. 激光技术, 2002, 26(1): 23~25.
- [3] LEE S, KM S K, YUN M *et al* Design and fabrication of a diode-side-pumped Nd:YAG laser with a diffusive optical cavity for 500-W output power [J]. Appl Opt, 2002, 41(6): 1089~1094.
- [4] 安连生. 应用光学 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2000. 50.
- [5] KONNO S, KOJIMA T, FUJIKAWA S *et al*. High-brightness 138W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. Opt Lett, 2000, 25(2): 105~107.
- [4] BJORN E S, ABRAHAM P, PASQUARIELLO D *et al*. High gain, high efficiency vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. Indium Phosphide and Related Materials Conference, 2002, 12~16: 307~310.
- [5] 郭长志,陈水莲. 分布反射面发射垂直微腔半导体激光器的微腔效应 [J]. 物理学报, 1997, 46(9): 1731~1743.
- [6] 姚海峰,潘炜,罗斌 *et al* 新型垂直腔半导体光放大器中有效腔长的理论分析 [J]. 激光杂志, 2003, 24(6): 9~10.
- [7] JOACHIM P, STAFFAN B, JOHN E B. Design and analysis of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(1): 127~133.
- [8] 唐晋发,郑权. 应用薄膜光学 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1984. 51.
- [9] 栖原敏明. 半导体激光器基础 [M]. 北京:科学出版社, 2002. 91~93.
- [10] AGRAWAL G P, DUTTA N K. Semiconductor lasers [M]. 2nd ed, New York: van Nostrand Reinhold Company, 1993. 319~333.