

LD 面阵侧面泵浦 Nd:YAG 晶体吸收光场研究

李耀, 李阳, 王超*

(长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了研究 LD 面阵侧面泵浦 Nd:YAG 晶体吸收光场的均匀性, 本文提出了一种新的求解泵浦光路径的计算方法。首先建立了适用于不同泵浦结构的激光二极管多侧面泵浦全固态激光器的晶体吸收光场分布模型; 然后模拟并分析了单向面阵泵浦结构各参量: bar 条个数、bar 条间隔、bar 面倾斜程度对面阵泵浦晶体吸收光场均匀性及泵浦效率的影响。本文研究为 LD 侧面泵浦全固态激光器的设计和研究提供理论基础。

关键词: LD 面阵泵浦; 光线追迹法; 光场均匀性

中图分类号: TN24; O043 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20181102.0206

Absorption light field of side-pumped Nd:YAG crystal in LD planar arrays

LI Yao, LI Yang, WANG Chao*

(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: 105665608@qq.com

Abstract: To study the uniformity of the absorption light field of the side-pumped Nd:YAG crystal in the LD planar arrays, a new calculation method for solving the pump optical path is proposed in this paper. Firstly, we establish a distribution model of crystal absorption light field suitable for laser diode multi-side-pumped all-solid-state laser with different pump structures; Then, the influence of the parameters of unidirectional planar array pump structure, including number of bars, the interval of bars, inclination of bars surface, on the uniformity and pumping efficiency of absorption light field in planar array pumped crystals are simulated and analyzed. This study provides a theoretical basis for the design and research of LD side-pumped all-solid-state laser.

Key words: diode planar arrays pumped; method of ray trace; pump uniformity

1 引言

激光二极管泵浦全固态激光器因具有寿命长、效率高及结构紧凑等优点,已经成为固体激光器发展的主要方向,并在激光测距、激光加工、激光雷达等领域得到了广泛的应用^[1-7]。二极管泵浦固体激光器主要有侧面泵浦和端面泵浦两种^[8-13]。

侧面泵浦结构简单、性能比较稳定,与端面泵浦相比更容易实现激光高功率输出。但是侧面泵浦固体激光器中泵浦光是沿径向方向进入晶体的,泵浦光分布均匀,进而影响到输出激光的光束质量。为了改善侧面泵浦激光器的激光输出光束质量,需研究不同泵浦结构下泵浦光的分布均匀性,进而为激光器泵浦结构参数的设计、输出光束质量提高及克服热效应等问题提供相应的理论基础。目前对侧面泵浦棒状晶体吸收光场的研究主要侧重于线阵泵浦棒状激光器上,对于面阵泵浦棒状激光器晶体吸收光场的研究较为少见。在使用光线追迹法模拟计算晶体吸收光场强度时,利用三角形角度关系求解面阵泵浦的传统方法具有很大局限性。针对这种情况,本文提出了一种利用直线与直线之间关系来求解折射光线的方法,大大降低使用光线追迹法追踪面阵泵浦时计算量大的问题,同时降低了使用 Matlab 编译程序的难度。本文首先建立了面阵泵浦晶体吸收光场模拟程序,分析不同泵浦条件下面阵泵浦晶体吸收光场均匀性及泵浦效率。

2 光线追迹

光线追迹法通过跟踪与晶体表面发生折射的光线从而得到光线经过路径,模拟计算后不但可以直观观察出激光棒内抽运光的能量分布情况,而且得出的模型与实际情况十分接近。但也存在计算量大,程序设计复杂等问题。对线阵泵浦光分布模拟时,为了降低工作量,通常将二极管发出的光用高斯光束来代替,进而得到泵浦光分布^[14-16]。如图1所示为一种简单的LD面阵侧面泵浦示意图。

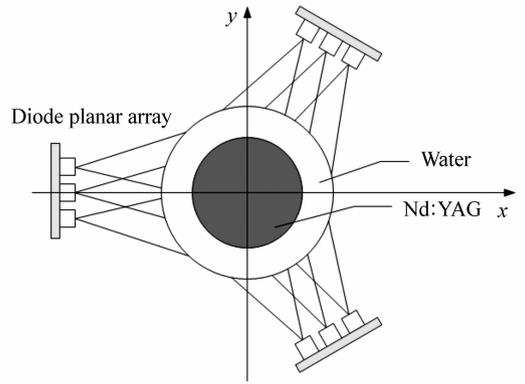


图1 LD面阵侧面泵浦示意图

Fig. 1 Side-pumped by LD planar array

在建立面阵泵浦晶体吸收光场时,由于不能简单地把LD面阵泵浦发出的光用高斯光代替,这就需要使用光线追迹法来求解泵浦光经过晶体棒后的折射光线。在此基础上,本文提出了一种新的确定泵浦光在晶体中位置的计算方法,图2是面阵泵浦单侧面泵浦光传播到晶体棒上的情形。

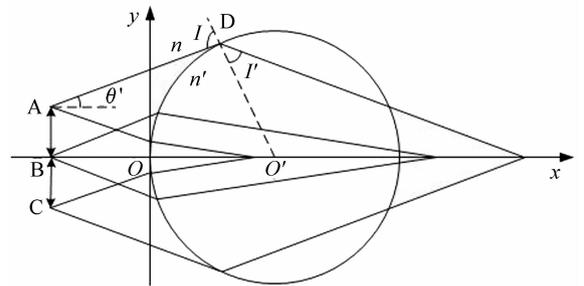


图2 LD面阵单侧面泵浦示意图

Fig. 2 Schematic diagram of unilateral pumping for LD planar arrays

由图2可知,泵浦光AD的直线方程为:

$$y = \tan\theta_i(x - x_0) + y_0, \quad (1)$$

激光晶体棒边缘构成的圆方程为:

$$(x - r)^2 + y^2 = r^2. \quad (2)$$

联立(1)、(2)两式,可得交点D的坐标为 x_1, y_1 。利用两直线夹角公式,求出入射角 I

$$\tan I = \frac{\tan\theta_i - \frac{y_1}{x_1 - r}}{1 + \tan\theta_i \frac{y_1}{x_1 - r}}. \quad (3)$$

利用正弦定理可求得对应的折射角,再通过两直线角公式可求出折射光线斜率 k' :

$$k' = \frac{\tan\Gamma + \frac{y_1}{x_1 - r}}{1 - \tan\Gamma \frac{y_1}{x_1 - r}} \quad (4)$$

代入交点 D 的坐标,求得折射光线方程为:

$$y = k'(x - x_1) + y_1, \quad (5)$$

该算法在计算折射光线方程时无需构建三角形求解相应角度,因此在追踪面阵泵浦离轴 bar 条的折射光线时计算复杂程度会大大降低,相应地也减轻了模拟晶体吸收光场的编程难度。另外,由于 LD 泵浦光源位置是以坐标点的形式给出的,使得使用该方法建立的程序通用性很强,对于常见的线阵泵浦、面阵泵浦、LD 阵列交错泵浦均可使用。同时对一些激光器实际使用中遇到的问题,也可使用该方法予以解决。例如在固体激光器侧面面阵泵浦源装配时,面阵泵浦源可能会出现一定的倾斜,这时只需把面阵泵浦 bar 条发光点的坐标位置按一定倾斜角度排列,即可求出面阵泵浦倾斜时晶体吸收光场的分布情况,其计算结果更接近实际。

3 单向面阵泵浦在不同泵浦条件下晶体吸收光场

在其他泵浦条件相同时,不同泵浦结构晶体的吸收光场会存在很大差异。通过对比研究单向面阵泵浦在不同 bar 条个数、不同 bar 条间隔、不同 bar 面倾斜程度下晶体吸收光场均匀性及泵浦效率的差异,可为研究面阵侧面泵浦全固态激光器提供理论基础。模拟条件如下:总泵浦功率为 100 W,泵浦距离为 1.5 mm,晶体半径 $R = 2$ mm,晶体吸收系数 $\alpha = 0.1 \text{ mm}^{-1}$,晶体折射率 $n = 1.86$ 。

3.1 单向面阵泵浦不同 bar 条个数下的光场分布

面阵泵浦面上 bar 条个数的多少直接影响到晶体吸收光场的均匀性及泵浦效率。因此研究 bar 条个数对研究面阵泵浦有着至关重要的意义。图 3 是在 bar 条间隔为 0.8 mm 模拟出的晶体吸收光场分布图。图 4 为功率平均值及功率方差随

bar 条个数的变化情况,纵坐标是每网格功率及功率变化。

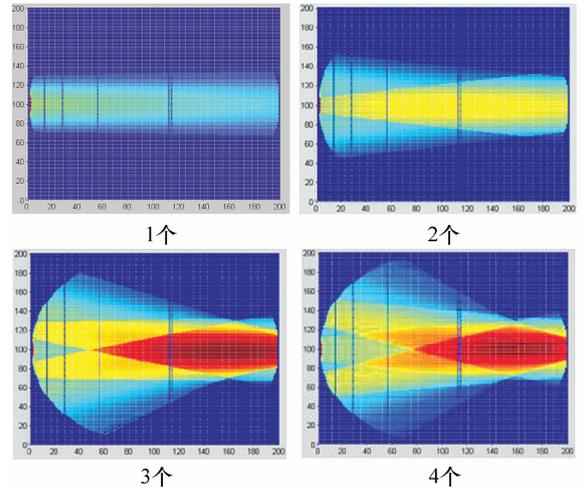


图 3 不同 bar 条个数下单向面阵泵浦光场分布图
Fig. 3 Distributions of light field for unilateral pumping with different number of diode bars

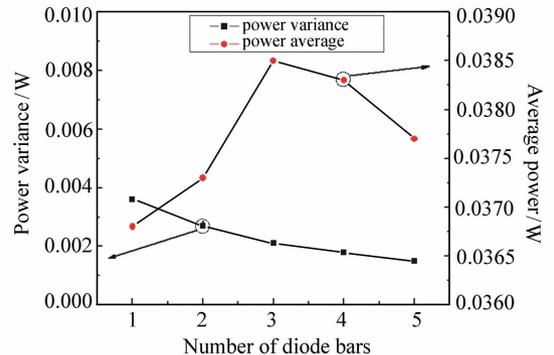


图 4 功率平均值及功率方差随 bar 条个数变化情况
Fig. 4 Power average and power variance change with the number of diode bars

从图 3、图 4 中可以看出,随着 bar 条个数的增加,单向面阵泵浦晶体光场的分布均匀性变差,泵浦效率随着 bar 条个数的增加呈现先增加后减小的趋势。这是因为总的泵浦功率一定,当 bar 条个数较少时,泵浦光照射到晶体棒上的面积较小,晶体吸收泵浦光不均匀,吸收效率也较低。随着 bar 条个数的增加,泵浦面积增大,晶体横截面内吸收泵浦光的面积变大,光场均匀性变好,泵浦效率升高。当 bar 条个数增加到 4 个时,会有部分泵浦光从晶体棒两侧穿过,导致泵浦效率降低,但晶体吸收光场均匀性会进一步提高。

3.2 单向面阵泵浦不同 bar 条间隔时的光场分布

对于面阵泵浦来说,不同的 bar 条间隔下,晶体的吸收光场也会有所不同,模拟不同 bar 条间距下晶体的吸收光场进行对比分析,结果如图 5、图 6 所示。

从图 5、图 6 中可以看出,bar 条个数对晶体吸收面阵泵浦光有着较大的影响,随着 bar 条间隔的增大,面阵泵浦晶体吸收光场均匀性升高,泵浦效率则随着 bar 条间距的增大先增大后减小。当 bar 条间隔较小时,由于发散角的限制,泵浦光只能照射在晶体棒的局部位置,致使晶体对泵浦

光的吸收效果较差、晶体吸收光场均匀性降低。当 bar 条间隔增大时,虽然泵浦光可以均匀照射到晶体棒上,但是由于 bar 条间隔过大,会有一部分泵浦光从晶体两侧穿过,致使总的泵浦效率变低。因此,在设计激光器选择晶体半径时要适当兼顾晶体吸收光场均匀性与泵浦效率两方面。综合考虑晶体吸收光场均匀性与泵浦效率,当 bar 条间隔选定在 1 mm 时较为合理。

3.3 单向面阵泵浦在不同倾斜角度条件下的光场分布

单向面阵泵浦 bar 面不同倾斜角度下的情况如图 7、图 8 所示。从图 7、8 可以看出,单向面阵

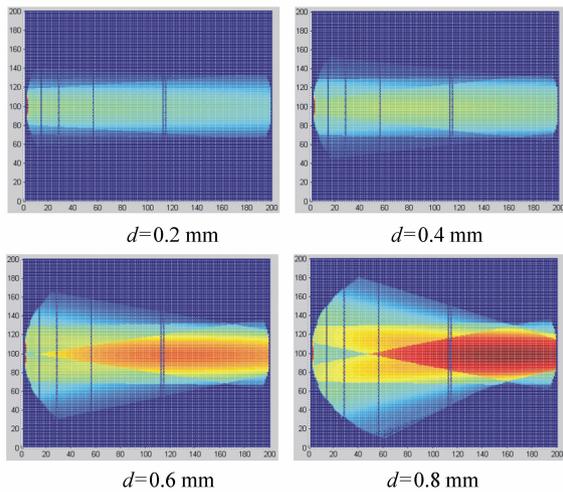


图 5 不同 bar 条间隔条件下光场分布图

Fig. 5 Distributions of light field under diode bars with different intervals

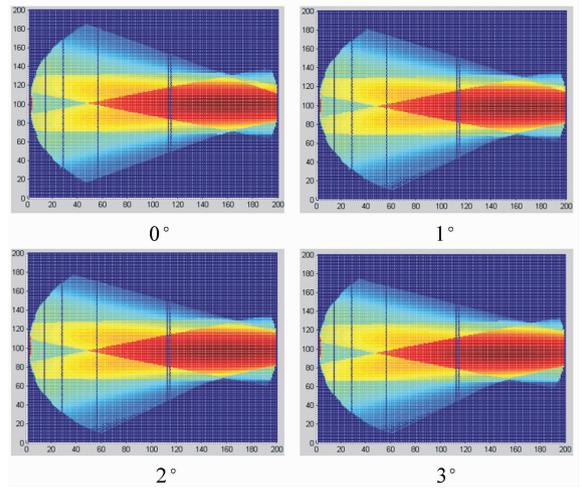


图 7 不同 bar 面倾斜度条件下光场分布图

Fig. 7 Distributions of light field under diode bars surface with different inclinations

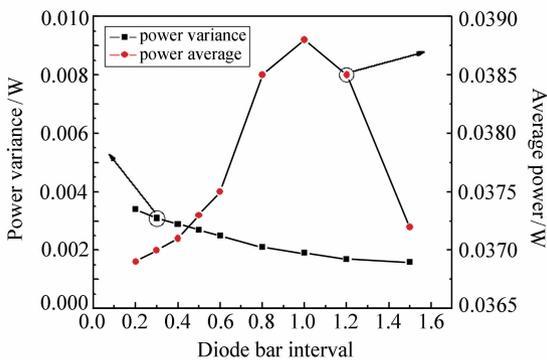


图 6 功率平均值及功率方差随 bar 条间隔的变化情况

Fig. 6 Average power and power variance change with diode bar interval

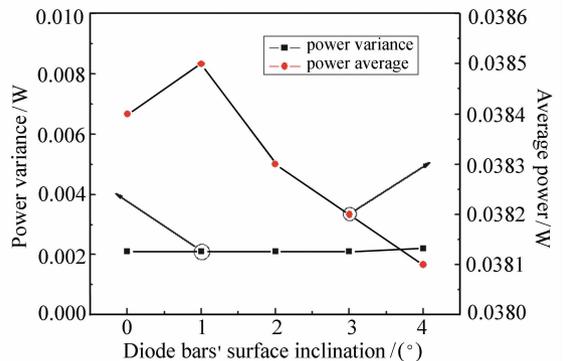


图 8 功率平均值及功率方差随 bar 面倾斜度的变化情况

Fig. 8 Average power and power variance change with diode bars' surface inclination

泵浦略微倾斜对晶体吸收光场均匀性的影响非常低,晶体吸收光场均匀性几乎没有变化。泵浦效率则是随着 bar 面倾斜度的增加而降低,但变化范围并不是太大。当面阵泵浦以 bar 面为中心倾斜时,泵浦光照射到晶体面上的位置发生了变化,由于 bar 条具有一定的发散角,单向面阵泵浦 bar 面的略微倾斜并不能在很大程度上改变泵浦光照射到晶体面上的位置。因此,bar 面的略微倾斜对面阵泵浦晶体吸收光场的均匀性影响较小。

4 结 论

本文提出了一种新的求解泵浦光路径的计算

方法,其较使用光线追迹法模拟计算全固态激光器侧面泵浦 Nd:YAG 晶体吸收功率的计算及使用 Matlab 模拟晶体吸收光场程序的复杂程度大大降低。通过建立 LD 面阵侧面泵浦 Nd:YAG 激光器晶体吸收光场分布模型,模拟计算了在总泵浦功率为 100 W,泵浦距离为 1.5 mm,晶体半径 $R = 2$ mm,晶体吸收系数 $\alpha = 0.1 \text{ mm}^{-1}$,晶体折射率 $n = 1.86$ 条件下,面阵泵浦晶体吸收光场均匀性及泵浦效率随 bar 条个数、bar 条间隔、bar 面倾斜程度的变化情况。可得到如下结论:在兼顾泵浦效率与均匀性时,bar 条个数为 3,bar 条间隔为 1 mm,bar 面的倾斜度低于 1° 时,LD 面阵侧面泵浦 Nd:YAG 激光器的泵浦效果可以达到最优。

参考文献:

- [1] 刘友强,曹银花,李景,等. 激光加工用 5 kW 光纤耦合半导体激光器[J]. 光学精密工程,2015,23(5):1279-1286. LIU Y Q, CAO Y H, LI J, et al. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1279-1286. (in Chinese)
- [2] 韩金樑,王超. 基于内循环水冷系统的小型化电光调 Q 激光器[J]. 激光与红外,2016,46(1):39-43. HAN J L, WANG CH. Miniaturization electro-optically Q-switched laser based on liquid cooling system of internal recycle [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(1):39-43. (in Chinese)
- [3] 朱洪波,刘云,郝明明,等. 高效率半导体激光器光纤耦合模块[J]. 发光学报,2011,32(11):1147-1151. ZHU H B, LIU Y, HAO M M, et al. High efficiency module of fiber coupled diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(11):1147-1151. (in Chinese)
- [4] 周维虎,丁蕾,王亚伟,等. 光束平差在激光跟踪仪系统精度评定中的应用[J]. 光学精密工程,2012,20(4):851-857. ZHOU W H, DING L, WANG Y W, et al. Application of bundle adjustment to accuracy evaluation of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):851-857. (in Chinese)
- [5] 余辉,谭胜. 高能激光武器的发展和应用前景[J]. 红外与激光工程,2002,31(3):267-271. YU H, TAN SH. Development and application prospects of high-energy laser weapon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3):267-271. (in Chinese)
- [6] 黄继鹏,王延杰,孙宏海,等. 激光光斑位置精确测量系统[J]. 光学精密工程,2013,21(4):841-848. HUANG J P, WANG Y J, SUN H H, et al. Precise position measuring system for laser spots[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4):841-848. (in Chinese)
- [7] 张志军,刘云,缪国庆,等. 2 kW 半导体激光加工光源[J]. 发光学报,2013,34(3):334-339. ZHANG ZH J, LIU Y, MIAO G Q, et al. The 2 kW semiconductor laser processing light[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(3):334-339. (in Chinese)
- [8] 蔡志强,姚建铨,温午麒,等. LD 侧泵激光器抽运光和温度分布数值研究[J]. 光电子·激光,2004,15(11):1305-1310. CAI ZH Q, YAO J Q, WEN W L, et al. Simulation of absorbed power and temperature distribution in LD side-pumped laser[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2004, 15(11):1305-1310. (in Chinese)
- [9] 黄峰,汪岳峰,牛燕雄. LD 端面泵浦的高重复 Nd:YAG 激光器的热效应研究[J]. 红外与激光工程,2004,33(4):358-361. HUANG F, WANG Y F, NIU Y X, Study on thermal effects of LD end-pumped high-repetition-rate Nd:YAG laser[J]. *In-*

frared and Laser Engineering,2004,33(4):358-361. (in Chinese)

- [10] BEACH R, REICHERT P, BENETT W, *et al.*. Scalable diode-end-pumping technology applied to a 100-mJ Q-switched Nd³⁺:YLF laser oscillator[J]. *Optics Letters*,1993,18(16):1326-1328.
- [11] 韩耀锋,张若凡. LDA 侧面泵浦固体激光器泵浦结构参数优化[J]. *应用光学*,2014,35(5):895-901.
HAN Y F, ZHANG R F, Optimization of pump structure parameters in LDA side-pumped solid state laser[J]. *Journal of Applied Optics*,2014,35(5):895-901. (in Chinese)
- [12] 赵海霞,姜东升,赵鸿,等. 二极管侧面泵浦固体激光器热效应研究[J]. *激光与红外*,2001,31(4):210-211.
ZHAO H X, JIANG D SH, ZHAO H, *et al.*. Study on thermal effect of high power laser side pumped by diode arrays[J]. *Laser & Infrared*,2001,31(4):210-211. (in Chinese)
- [13] WEN J X, SIU C T, YEE L L, *et al.*. Thermal and optical properties of diode side-pumped solid state laser rods[J]. *Optics and Laser Technology*,2000,32:193-198.
- [14] 陈薪羽,金光勇,王超,等. LD 侧面泵浦全固态激光器光场均匀性研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*,2009,32(3):352-355.
CHEN X Y, JIN G Y, WANG CH, *et al.*. Study for pumping uniformity in LD side-pumped all solid state laser[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*,2009,32(3):352-355. (in Chinese)
- [15] MENG J Q, CHEN W B, HOU X. Comparison of different side-pumping configurations for high power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese Optics Letters*,2003,1(9):538-540.
- [16] 王春雨,朱小磊,陆雨田. LD 侧面泵浦固体激光器泵浦光分布模拟[J]. *光子学报*,2007,36(6):961-965.
WANG CH Y, ZHU X L, LU Y T. Pumping intensity distribution in LD side pumped solid state laser[J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,36(6):961-965. (in Chinese)

作者简介:

李 耀(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光物理与新型激光器等方面的研究。E-mail:1471369160@qq.com



王 超(1980—),男,博士,助理研究员,主要从事全固态激光及非线性频率变换技术研究。E-mail:105665608@qq.com

