

端面泵浦复合结构板条介质泵浦光束不均匀性的仿真研究

雷呈强¹, 汪岳峰¹, 黄峰¹, 侯军燕^{1,2}, 殷智勇¹, 段欣涛¹

(1. 军械工程学院光学与电子工程系, 河北石家庄 050003; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要:基于 Zemax 软件下的非序列模式(Non-Sequential Mode)光线追迹法, 分别模拟复合结构板条介质泵浦端面和掺杂介质区工作端面上的光强度分布。由追迹结果可知, 经过整形, 在泵浦面强度分布均匀的泵浦光束经过非掺杂介质区传播到掺杂介质工作端面后光束分布均匀性大大降低。研究表明复合结构板条介质中非掺杂介质区影响了泵浦光束, 即泵浦光在非掺杂介质区传播过程中发生全内反射, 导致部分光束在实际工作端面的部分区域发生叠加, 从而致使实际工作端面泵浦光束分布不均匀。

关键词:端面泵浦; 复合结构板条介质; 不均匀性; 光束整形; 泵浦耦合

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Simulated study of pumping beam's non-homogeneity in end-pumped composite slab

LEI Cheng-qiang¹, WANG Yue-feng¹, HUANG Feng¹

HOU Jun-yan^{1,2}, YIN Zhi-yong¹, DUAN Xin-tao¹

(1. Department of Optics and Electron, Ordnance Engineer College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The light intensity distributions on pumped face and end surface in composite slab are simulated with the method of Non-Sequential Mode ray tracing using software Zemax. From the tracing results, we can find that when the pumping beam is on the pumped face, the light intensity distribution is homogeneous, but when it is on the end surface after transmitting through the undoped crystal the light intensity distribution is non-homogeneous. After investigation we find that the undoped crystal affects the pumping beam, that is to say, there is total internal reflection when the pumping beam is propagating in the undoped crystal, which induces the overlap of pumping beam in partial region of end surface, then induces the non-homogeneity of pumping beam distribution in the end surface.

Key words: end-pumped; composite slab medium; nonhomogeneity; beam shaping; pumped and coupling

1 引言

激光二极管泵浦的全固态激光器(DPSSL)因具有转换效率高、稳定性好、结构紧凑、使用寿命长等优点使其成为当今固体激光技术研究的热点之一, 其中板条激光器由于泵浦效率高、散热效果好而受到广泛重视^[1-4]。1972年, 美国通用电气公司的 Martin 和 Chernoch 提出了 zigzag 板条激光器^[5], 在均匀泵浦的情况下, 工作介质内的温度梯度是一维分布的, 且介质内光束沿着“之”字形传播, 能有效

消除一阶热聚焦、应力双折射和热致退偏效应^[6-7]。虽然 zigzag 板条的结构特点使激光沿 zigzag 光路传播能消除板条内的热效应, 但板条两端面的热形变是导致畸变的一个主要因素^[8]。实际工程应用中, 常在激光板条的两端键合一段非掺杂的晶体帽, 即采用复合结构板条介质, 以减小因掺杂区域产生的

作者简介: 雷呈强(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光和激光光束整形技术方面的研究。E-mail: hnxysclcq@163.com
收稿日期: 2010-11-16; 修订日期: 2011-01-06

热而引起的端面效应。复合介质结构^[9-11]可以同时起到热扩散和增大散热面积的作用,能够有效地降低和改善介质内部温度和应力的分布^[12]。但此复合介质结构给泵浦光束的均匀性带来不良影响,原本均匀的泵浦光束经过非掺杂介质区域的传播,到达掺杂介质实际工作端面时将变得不再均匀,本文对此泵浦光束的不均匀性进行了研究和分析。

2 双端泵浦复合 zigzag 板条结构

双端面泵浦复合 zigzag 板条的结构如图 1 所示。采用 Nd:YAG/YAG 复合结构板条介质,尺寸为 67 mm × 5.6 mm × 1.7 mm。设坐标原点在几何中心,复合板条中间是掺杂区域, Nd³⁺ 掺杂浓度为 0.3 at. %, 其吸收系数为 2.13 cm⁻¹。介质两端各键合一段非掺杂的晶体帽,且加工成 45°角结构。其中掺杂区域 Nd:YAG 介质长度为 49 mm,两端未掺杂 YAG 介质长度均为 9 mm。采用两个全内反射 (total internal reflection, TIR) 面作为冷却面,板条上下两个大面在钢层的间隔下与热沉接触进行实时冷却。

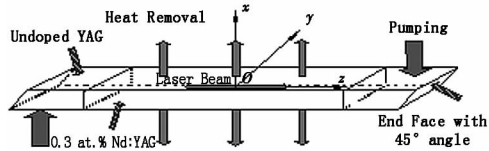


图 1 双端泵浦复合 zigzag 板条结构示意图

Fig.1 sketch of dual-end-pumped composite zigzag slab

在该复合 zigzag 板条介质的泵浦中,泵浦光束由切割成 45°角端面下方非掺杂介质 YAG 端面(端面 A)入射进入板条介质,经由 45°角端面后转折 90°沿非掺杂介质区域传播至掺杂介质 Nd:YAG 实际工作端面(端面 B)进行泵浦。介质内激光束沿“之”字形路径传输并被放大输出,如图 2 所示。

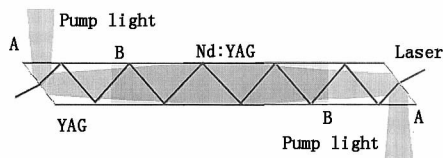


图 2 双端泵浦复合 zigzag 板条泵浦耦合示意图

Fig.2 sketch of dual-end-pumped composite zigzag slab pumped and coupling

3 LD 光束整形、泵浦耦合系统设计

由端面泵浦结构及板条尺寸可知,泵浦光斑大小应为晶体端面大小 1.7 mm × 5.6 mm。基于成像光学原理,采用成像光学器件进行 LD 双端泵浦复合 zigzag 板条激光器的光束整形、泵浦耦合系统设计,并利用光学设计软件 Zemax 基于光线追迹的方

法对该泵浦耦合系统进行模拟仿真。

3.1 LD 光束整形系统设计

泵浦光源采用激光二极管阵列(LD arrays),由 22 个 bar 条纵向排列构成,bar 条之间的间隔为 1.8 mm,且每个 bar 条由 49 个激光发射单元线性排列构成,相邻单元的间隔为 200 μm,bar 条宽度为 100 μm。由于激光二极管快轴方向的发散角较大,通常达到 40°左右,因此首先需要对其进行预准直,因其快轴方向 M² 因子接近于 1,故较容易达到很好的准直效果。采用微柱透镜与 bar 条一一对应的方式进行预准直。LDA 输出光经微柱透镜初步整形,快轴发散角约为 0.5°,慢轴发散角约为 8°,再经过光束整形系统的进一步整形作用得到所需要的泵浦光斑。抽运源光束整形设计思路如图 3 所示。

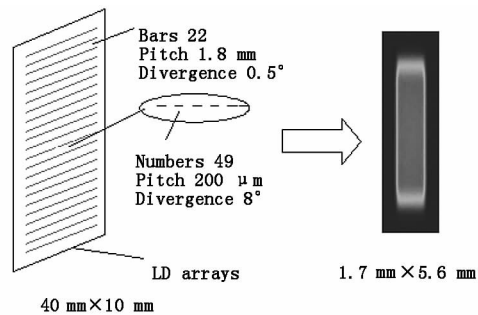


图 3 泵浦源光束整形设计思路

Fig.3 the design of pumping beam shaping

为了实现矩形均匀光斑的设计目标,快轴方向对应转换为矩形的长方向,而均匀性目标则由各个子光束的自发散叠加实现。因此首先将快轴方向聚焦,则各个子光束在焦点处重合后将会分离,光斑随之扩大,适当选择各个子光束的发散角将会由于子光束之间的叠加实现矩形抽运光斑长度方向的均匀分布。而慢轴方向对应目标矩形光斑的宽方向。首先将慢轴方向进行聚焦,则慢轴方向的各个子光束将在焦点处重合。然后将该焦点处的光场分布视作成像系统的物面,通过一成像系统将该像成在快轴方向的焦点处,从而实现快慢轴方向目标像面的重合。同时由于高功率激光二极管慢轴方向的光场分布为高阶模分布,因此慢轴方向子光束相互重合,且系统允许适当的像差存在,实现慢轴方向成像的均匀性,最终实现矩形的均匀泵浦光斑。成像光学器件选用 Zemax 软件非序列元件 (Non-Sequential Components) 中的标准透镜 (Standard Lens) 和环形透镜 (Toroidal Lens),依据成像光学原理进行设计,并采用 Zemax 软件基于光线追迹法进行模拟,如图 4、图 5 所示。



图4 快慢轴方向设计方案

Fig. 4 design schemes of fast and slow axis

经过适当的优化设计所得的设计结果如图5所示。



图5 设计结果图

Fig. 5 solid schemes of design results

3.2 泵浦耦合系统设计

在上述基于 Zemax 的泵浦光束整形系统的基础

上进行双端泵浦复合 zigzag 板条激光器的泵浦耦合系统设计,即经光束整形系统整形后的泵浦光束由目标像面处(光斑大小约为 $1.7\text{ mm} \times 5.6\text{ mm}$)耦合进板条介质。考虑到双端面泵浦结构的对称性,并忽略对面少量泵浦光束到达的影响,只取一侧泵浦耦合系统和非掺杂介质部分进行光线追迹,非掺杂介质由 Zemax 非序列元件(Non-Sequential Components)中的矩形体(Rectangular Volume)来模拟,且端面切割成 45° 角结构。光线追迹如图6所示。

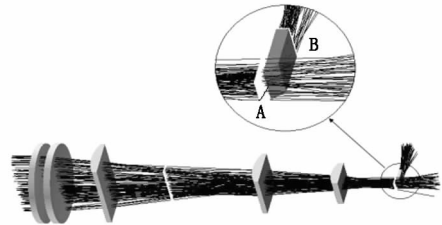


图6 单侧泵浦耦合系统和非掺杂介质部分的光线追迹

(A 面为 45° 角端面下方的泵浦面;B 面为掺杂部分的实际工作端面)

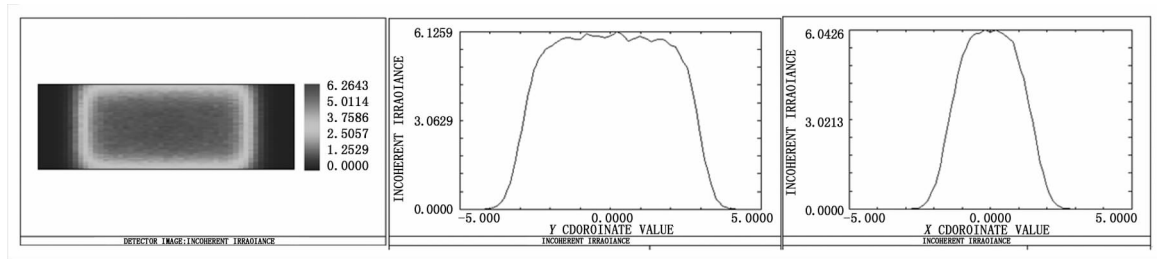
Fig. 6 ray tracing of pumped coupling system and undoped YAG(A: pumped face; B: end surface of Nd:YAG)

4 不均匀性分析

基于上述泵浦耦合系统分别进行泵浦端面(端面 A)和板条键合端面(端面 B)的泵浦光束均匀性分析。利用 Zemax 软件下的非序列模式(Non-Sequential Mode)进行光线追迹,并分别模拟计算 A、B 两目标面上的光强度分布。为了更加全面地研究基于此系统的泵浦光束的分布特性,又在掺杂介质区内取了三个近似等间距特征工作面,并分别模拟计算了该特征工作面上的泵浦光强度分布。考虑到双端面泵浦结构的对称性,这里只进行单端泵浦情形下的近似仿真研究。在光线追迹的过程中,激光二极管阵列快轴方向的光强分布按照基模高斯分布,慢轴方向按照超高斯分布(超高斯因子为 2)进行 Monte Carlo 模拟,每条光线按照光源归一化分布设置其所携带的能量。并将目标面划分为 51×51 的网格,统计到达各个网格内的光线条数及其所携带的归一化光强度。图示均为追迹 250 万条光线所得的各端面上的光强度分布。

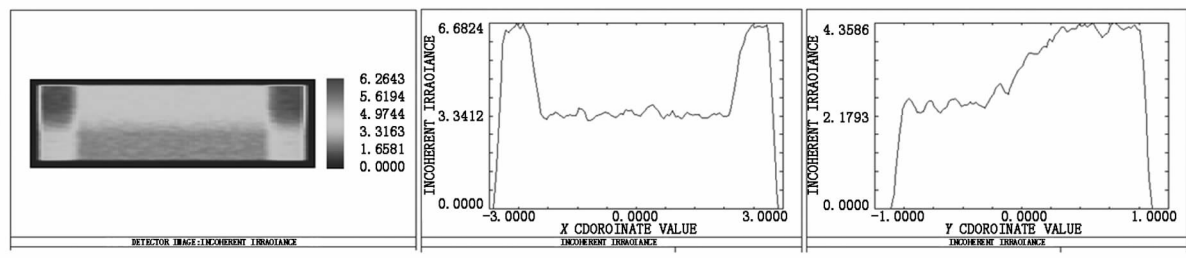
通过光线追迹结果可知,泵浦光束经过整形,到达泵浦端面的光斑大小约为 $1.7\text{ mm} \times 5.6\text{ mm}$,

且在该范围内泵浦光束分布均匀(如图7所示)。而均匀的矩形泵浦光斑通过非掺杂介质区传播到达键合端面后光强度分布均匀性大大降低:沿长轴方向,泵浦光束主要集中于键合面两端,中间区域光强较弱;沿短轴方向也存在明显的光强度不均匀分布,一部分较强另一部分较弱(如图8所示)。如图9所示为考虑了掺杂介质吸收情况,在掺杂介质区三个近似等间距特征工作面上的泵浦光强度分布图,更全面地反映出了泵浦光束分布的不均匀特性。上述结果表明复合板条非掺杂介质区对泵浦光的影响是导致泵浦光束均匀性下降的关键,图10显示出沿泵浦光斑长轴方向和短轴方向入射泵浦光束在非掺杂介质区中发生的折反射情况。由图中可知,沿长轴方向光强度两端强于中间的明显不均匀分布主要是由于泵浦光在板条的两个侧边面发生全内反射导致部分光束在实际工作面两端发生叠加;沿短轴方向泵浦光束的不均匀分布主要是由于泵浦光在板条的上下两个大面发生全内反射导致部分光束在实际工作端面的部分区域发生叠加。



(a) 二维光强度分布 (b) 矩形长轴方向分布 (c) 矩形短轴方向分布
 (a) the distribution of light intensity in planar (b) the distribution of long axis of rectangle (c) the distribution of short axis of rectangle
 图7 泵浦面(端面A)光强度分布

Fig.7 the light intensity distribution of pumped face



(a) 二维光强度分布 (b) 矩形长轴方向分布 (c) 矩形短轴方向分布
 (a) the distribution of light intensity in planar (b) the distribution of long axis of rectangle (c) the distribution of short axis of rectangle

图8 键合端面(端面B)光强度分布

Fig.8 the light intensity distribution of combining surface

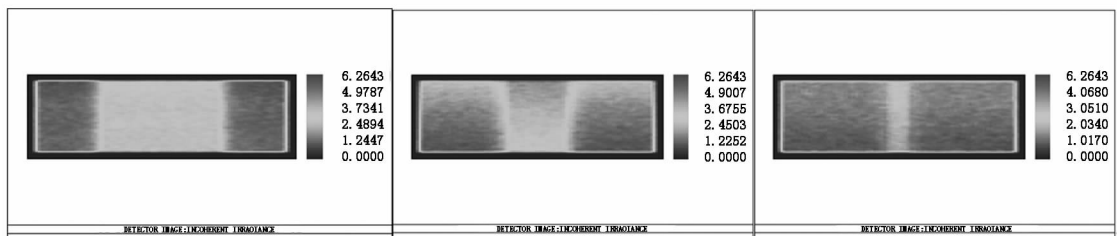


图9 掺杂介质区内三个特征工作面上泵浦光强度分布图,其位置分别为 $z = -16.5, z = -8.5, z = 0$

Fig.9 the light intensity distribution of three end surfaces in doped region, $z = -16.5, z = -8.5$ and $z = 0$ cross faces of the slab

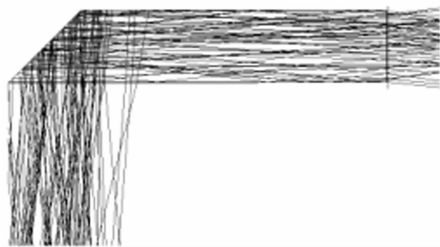


图10 入射泵浦光束在非掺杂介质中发生的折射

Fig.10 reflection and refraction of pumping beams in undoped YAG

5 结论

本文以 LD 双端泵浦复合结构板条介质的泵浦光束不均匀性为研究对象,在泵浦结构分析的基础上,基于成像光学原理进行了 LD 光束整形以及泵

浦耦合系统的设计,并利用 Zemax 光学软件进行了模拟仿真。基于所设计的泵浦耦合系统,利用 Zemax 软件下的非序列模式(Non-Sequential Mode)进行光线追迹,分别模拟泵浦端面、板条键合端面两目标面以及掺杂介质区内三个近似等间距特征工作面上的光强度分布。由追迹结果可知,泵浦光束经过整形,在泵浦端面光束均匀性较好,但经过非掺杂介质区传播到达掺杂介质区工作端面后泵浦光束分布均匀性大大降低,说明复合结构板条介质中非掺杂部分给均匀性泵浦带来了不良影响,即泵浦光在非掺杂介质区传播过程中发生全内反射,导致部分光束在掺杂介质区工作端面的部分区域发生叠加,从而

导致实际工作端面泵浦光束分布不均匀。通过对复合结构板条介质泵浦光束不均匀性及其产生原因的分析,为以后的泵浦耦合系统的设计及其改进提供指导作用。

参考文献:

- [1] Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. IEEE J of Quan Elec, 1988, 24 (6): 895 - 912.
- [2] A Bayramian, P Armstrong, R L Brast, et al. System operations of mercury: a diode-pumped solid-state lasers [C]. CLEO/Euro, 2005: 1368.
- [3] T Kawashima, T Kurita, O Matsumoto, et al. Diode-pumped, thermally-edge-controlled slab-laser with high-energy and large-aperture [C]. CLEO/Euro, 2005: 473.
- [4] Yang Wenshi, Bi Guojiang, Sun Weina, et al. The experimental research of Nd:YAG slab laser side pumped by large-scale diode array [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(12): 926 - 928. (in Chinese)
杨文是, 秘国江, 孙维娜, 等. LD 阵列面状泵浦 Nd:YAG 板条激光器实验研究 [J]. 激光与红外, 2005, 35(12): 926 - 928.
- [5] W S Martin, J P Chernoch. Multi internal reflection face pumped laser; U. S. [P], 1972, 3126: 363.
- [6] Brian J Comaskey, Ray Beach, G Albrecht, et al. High average power diode-pumped slab laser [J]. IEEE J. Quant. Electron., 1992, 28(4): 992 - 996.
- [7] Armandillo E, Norrie G, Cosentino A, et al. Diode pumped high-efficiency high-brightness Q-switched Nd:YAG slab laser [J]. Opt. Lett., 1997, 22(15): 1168 - 1170.
- [8] W Koechner. Solid-state laser engineering [M]. Sun Wen, et al Transl. Beijing: Science Press, 2002: 395 - 398.
- [9] Liu Aiguo, Wang Junrong, Min Jingchun, et al. Thermal characteristics of slab by composite medium pumped by high laser power [J]. J. Engineering Thermophysics, 2003, 24(4): 676 - 678. (in Chinese)
柳爱国, 王军荣, 闵敬春, 等. 高能量光泵浦下板条状复合介质的热特性 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(4): 676 - 678.
- [10] Li Zhigang, Xiong Zhengjun, Huang Weiling, et al. Study of high power laser diode end-pumped composite crystal lasers [J]. Chinese J. Laser, 2005, 32(3): 297 - 300. (in Chinese)
李志刚, 熊政军, 黄维玲, 等. 高功率激光二极管端面抽运复合晶体激光器的研究 [J]. 中国激光, 2005, 32(3): 297 - 300.
- [11] Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng, et al. Study of thermal distortion in composite slab amplifiers [J]. Chinese J. Laser, 2010, 37(7): 1678 - 1682. (in Chinese)
刘亮, 郭少锋, 陆启生, 等. 复合结构板条放大器热致波前畸变研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1678 - 1682.
- [12] B Chen, Y Chen, J Simmons, et al. Thermal lensing of edge-pumped slab lasers [J]. Appl. Phys. B., 2006, 82: 413 - 418.